



TUGAS AKHIR - TE 141599

**ANALISA DAN SIMULASI DISTRIBUSI TEGANGAN
IMPULS *CONTINUOUS DISK WINDINGS* DAN
*INTERSHIELD DISK WINDINGS***

Akbar Dwi Syahputra
NRP 2213100064

Dosen Pembimbing
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Danar Fahmi, ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - TE 141599

**ANALYSIS AND SIMULATION OF IMPULSE VOLTAGE
DISTRIBUTION IN CONTINUOUS DISK WINDINGS AND
INTERSHIELD DISK WINDINGS**

Akbar Dwi Syahputra
NRP 2213100064

Advisors

Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Danar Fahmi, ST., MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**Analisa dan Simulasi Distribusi Tegangan Impuls *Continuous Disk Windings* dan *Intershiold Disk Windings***” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 4 Juni 2017

Akbar Dwi Syahputra
NRP. 2213100064

Halaman ini sengaja dikosongkan

**ANALISA DAN SIMULASI DISTRIBUSI TEGANGAN IMPULS
CONTINUOUS DISK WINDINGS DAN INTERSHIELD DISK
WINDINGS**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I,

Dosen Pembimbing II,

Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.

Daniar Fahmi, ST., MT.

NIP.19700712 199802 1 001

NIP.19890925 2014041 002



Halaman ini sengaja dikosongkan

ANALISA DAN SIMULASI DISTRIBUSI TEGANGAN IMPULS *CONTINUOUS DISK WINDINGS* DAN *INTERSHIELD DISK WINDINGS*

Nama : Akbar Dwi Syahputra
Pembimbing I : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Pembimbing II : Daniar Fahmi, ST., MT.

ABSTRAK

Studi ini dilakukan untuk mengetahui distribusi tegangan impuls gangguan tegangan lebih pada dua jenis belitan yaitu *continuous disk windings* dan *smit windings*. Permodelan belitan transformator terdiri dari komponen resistansi (R), induktansi (L), dan kapasitansi (C). Kapasitansi pada dua jenis belitan terdiri dari kapasitansi antar belitan (C_S) dan kapasitansi belitan terhadap tanah (C_G). Permodelan belitan transformator dilakukan menggunakan perangkat lunak ATPDraw. Tegangan impuls yang diberikan pada masing-masing jenis belitan menggunakan standar BIL pada setiap nilai kerja masing-masing jenis belitan. Dari hasil studi, kapasitansi antar belitan (C_S) pada jenis belitan *smit windings* memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan jenis belitan *continuous disk windings*. *Continuous disk windings* memiliki nilai C_S sebesar 0.712529 nF dan *smit windings* memiliki nilai C_S sebesar 9.73505 nF. Distribusi tegangan impuls pada jenis belitan *smit windings* memiliki persebaran yang lebih merata. Tegangan pada masing-masing jenis belitan akan mengalami redaman dengan nilai yang semakin menurun.

Kata kunci: *Continuous disk windings*, *smit windings*, kapasitansi antar belitan, kapasitansi belitan terhadap tanah, distribusi tegangan impuls, ATPDraw

Halaman ini sengaja dikosongkan

ANALYSIS AND SIMULATION OF IMPULSE VOLTAGE DISTRIBUTION IN CONTINUOUS DISK WINDINGS AND INTERSHIELD DISK WINDINGS

Name : Akbar Dwi Syahputra
1st Advisor : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
2nd Advisor : Daniar Fahmi, ST., MT.

ABSTRACT

This study determines the impulse voltage distribution in two types of winding, continuous disk windings and smit windings. The transformer winding model consists of resistance (R), inductance (L), capacitance between disk (C_s) and capacitance to the ground (C_g). Models of transformer windings are simulated using ATPDraw software. The impulse voltage applied to each winding type uses the BIL standard at nominal voltage. From the results of the study, the capacitance between disks (C_s) on smit windings has a bigger value than continuous disk windings. (C_s) continuous disk windings is 0.712529 nF and smit windings is 9.73505 nF. Impulse voltages distribution in smit windings has distribution well in each disk. Maximum voltage in smit windings are increased not too high than continuous disk windings. Voltage in each windings has a damped voltage with the end of line voltage will decrease.

Keywords: *Continuous disk windings, smit windings, capacitance between disks, capacitance to the ground, impulse voltage distribution, ATPDraw*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayat-Nya. Shalawat dan salam selalu tercurahkan kepada Nabi Besar Muhammad SAW, keluarga tercinta, sahabat serta kita semua selaku umatnya. Alhamdulillah penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “**Analisa dan Simulasi Distribusi Tegangan Impuls *Continuous Disk Windings* dan *Intershield Disk Windings***” tepat waktu.

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan menyelesaikan pendidikan sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Pelaksanaan dan penyelesaian Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak I Made Yulistya Negara dan Bapak Daniar Fahmi, atas segala pengetahuannya dan waktunya dalam membimbing penulis sampai terselesaikannya Tugas Akhir ini.
2. Kedua Orang tua penulis Ibunda Maziyah dan Ayahanda Bambang Wijanarko yang tiada henti memberikan doa, nasehat, dan semangat kepada penulis sehingga Tugas Akhir ini bisa terselesaikan tepat pada waktunya.
3. Kakak penulis Nadia Ayu Safitri yang selalu memberikan semangat dan tidak bosan dalam mengingatkan penulis untuk segera menyelesaikan tugas akhirnya.
4. Segenap keluarga besar yang selalu memberikan semangat dan hiburan kepada penulis selama mengerjakan Tugas Akhir.
5. Teman-teman yang bernama Irfan, Ayyub, Mamat, dan Nisa yang selalu menjadi penghibur dan pemberi semangat selama mengerjakan Tugas Akhir
6. Bapak Nus dan Bapak Supri selaku pihak dari PT Bambang Djaja yang selalu memberikan informasi mengenai topik Tugas Akhir ini.
7. Seluruh Dosen, dan Staff Karyawan Departemen Teknik Elektro-FTE, ITS yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

8. Teman–teman Angkatan 2013 lainnya yang membantu penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir.
9. Rekan-rekan asisten dan member Laboratorium Tegangan Tinggi yang mengingatkan dan mendukung penulis agar penulis bisa wisuda ke-116.
10. Teman teman dan sahabat lainnya yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis berharap semoga Tugas Akhir ini bermanfaat dan berguna bagi penulis khususnya dan juga bagi para pembaca pada umumnya.

Surabaya, Juni 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Sistematika Penulisan	3
BAB 2 TRANSFORMATOR DAN GELOMBANG	
IMPULS	5
2.1 Pengertian Transformator	5
2.2 Bagian-bagian Transformator	6
2.2.1 Inti Besi	6
2.2.2 Belitan Tranformator	8
2.3.3 Minyak Transformator	14
2.3 Susunan Dan Penyambungan Belitan	14
2.3.1 Penyusunan Belitan Bertindih	15
2.3.2 Penyusunan Belitan Berlapis	15
2.4 Gelombang Impuls	16
2.4.1 Pengertian Gelombang Impuls	16
2.4.2 Karakteristik Gelombang Impuls	17
2.5 <i>Basic Insulation Level (BIL)</i>	19
BAB 3 GELOMBANG IMPULS DAN BELITAN	
TRANSFORMATOR	23
3.1 Gelombang Impuls	23
3.2 Belitan Transformator	24
3.2.1 <i>Continuous Disk Windings</i>	25
3.2.2 <i>Smit Windings</i>	27
3.2.3 Distribusi Tegangan Belitan	29

BAB 4 HASIL DAN ANALISA DATA	33
4.1 Parameter Komponen Penyusun Belitan Transformator	33
4.1.1 <i>Continuous Disk Windings</i>	33
4.1.2 <i>Smit Windings</i>	39
4.2 Distribusi Tegangan Impuls	46
4.2.1 <i>Continuous Disk Windings</i>	46
4.2.2 <i>Smit Windings</i>	49
4.3 Bentuk Gelombang Pada Belitan	50
4.3.1 <i>Continuous Disk Windings</i>	52
4.3.2 <i>Smit Windings</i>	55
 BAB 5 PENUTUP	 61
5.1 Kesimpulan	61
5.2 Saran	61
 DAFTAR PUSTAKA	 63
RIWAYAT HIDUP	65

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Transformator Tipe Inti	7
Gambar 2.2	Transformator Tipe Cangkang	7
Gambar 2.3	Bentuk Belitan <i>Distributed Crossover Windings</i>	9
Gambar 2.4	a) Lilitan Spiral (<i>Single Layer</i>), (b) Lilitan Spiral (<i>Edge Wound</i>), (c) Lilitan Spiral (<i>Double Layer</i>)	10
Gambar 2.5	(a) <i>Helical Windings (single layer)</i> , (b) <i>Helical Windings (double layer)</i>	11
Gambar 2.6	<i>Continuous Disk Windings</i>	11
Gambar 2.7	<i>Interleaved Disc Windings (2 disc per group)</i>	12
Gambar 2.8	<i>Interleaved Disc Windings (4 disc per group)</i>	12
Gambar 2.9	<i>Smit Windings</i>	13
Gambar 2.10	Penyusunan Belitan Berlapis	15
Gambar 2.11	Standar Tegangan Impuls Petir	16
Gambar 2.12	Bentuk Gelombang Persegi yang Sangat Panjang	18
Gambar 2.13	Bentuk Gelombang Eksponensial	18
Gambar 2.14	Bentuk Gelombang dengan Muka Linier	19
Gambar 2.15	Bentuk Gelombang Sinus Teredam	19
Gambar 3.1	Permodelan Pengujian Belitan Transformator	23
Gambar 3.2	Rangkaian Pengganti Belitan Transformator	24
Gambar 3.3	Permodelan Kapasitansi Belitan <i>Continuous Disk Windings</i>	25
Gambar 3.4	Permodelan Kapasitansi Belitan <i>Smit Windings</i>	28
Gambar 3.5	Rangkaian Ekuivalen Belitan Transformator	30
Gambar 3.6	Distribusi Tegangan Impuls	31
Gambar 4.1	Komponen penyusun belitan transformator	33
Gambar 4.2	Grafik Tegangan Maksimal <i>Continuous Disk Windings</i>	46
Gambar 4.3	Standar Ketahanan Isolasi	47
Gambar 4.4	Distribusi Tegangan Impuls <i>Continuous Disk Windings</i>	48
Gambar 4.5	Distribusi Tegangan Impuls <i>Continuous Disk Windings</i> dengan nilai Cg sama	49

Gambar 4.6	Grafik Tegangan Maksimal <i>Smit Windings</i>	49
Gambar 4.7	Distribusi Tegangan Impuls <i>Smit Windings</i>	50
Gambar 4.8	Distribusi Tegangan Impuls <i>Smit Windings</i> dengan nilai C_g sama	50
Gambar 4.9	Gelombang Piringan ke-1 <i>Continuous Disk Windings</i> selama 0.001 detik	52
Gambar 4.10	Gelombang Piringan ke-11 <i>Continuous Disk Windings</i> selama 0.001 detik	53
Gambar 4.11	Gelombang Piringan ke-31 <i>Continuous Disk Windings</i> selama 0.001 detik	53
Gambar 4.12	Gelombang Piringan ke-51 <i>Continuous Disk Windings</i> selama 0.001 detik	53
Gambar 4.13	Gelombang Piringan ke-70 <i>Continuous Disk Windings</i> selama 0.001 detik	54
Gambar 4.14	Gelombang Piringan ke-1, 11, 31, 51, dan 70 <i>Continuous Disk Windings</i> selama 2 detik	55
Gambar 4.15	Gelombang Piringan ke-1 <i>Smit Windings</i> selama 0.001 detik	56
Gambar 4.16	Gelombang Piringan ke-31 <i>Smit Windings</i> selama 0.001 detik	56
Gambar 4.17	Gelombang Piringan ke-51 <i>Smit Windings</i> selama 0.001 detik	57
Gambar 4.18	Gelombang Piringan ke-71 <i>Smit Windings</i> selama 0.001 detik	57
Gambar 4.19	Gelombang Piringan ke-102 <i>Smit Windings</i> selama 0.001 detik	58
Gambar 4.20	Gelombang Piringan ke-1, 31, 51, 71, dan 102 <i>Smit Windings</i> selama 2 detik	58

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Standar IEC 60076-3	20
Tabel 4.1 Parameter <i>Continuous Disk Windings</i>	35
Tabel 4.2 Parameter <i>Smit Windings</i>	41

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan listrik saat ini sangatlah penting untuk menunjang kehidupan sehari-hari. Dengan pentingnya energi listrik maka diperlukan sistem distribusi dan sistem transmisi yang handal dan stabil. Salah satu yang mempengaruhi keandalan dan kestabilan sistem tenaga listrik adalah peralatan listrik yang beroperasi pada sistem kelistrikan tersebut. Salah satu peralatan utama dalam sistem tenaga adalah transformator.

Transformator merupakan salah satu peralatan listrik yang memiliki fungsi untuk mengubah nilai tegangan AC (*Alternating Current*) dengan menaikkan (*step up*) ataupun menurunkan (*step down*) nilai tegangan pada sistem tenaga [1]. Dengan pentingnya fungsi transformator maka diperlukan pengamanan untuk menghindari gangguan-gangguan dan menjaga kontinuitas kerja transformator.

Dalam penggunaannya di sistem tenaga listrik, transformator tentu akan mengalami berbagai macam gangguan. Salah satu gangguan adalah sambaran petir. Sebuah sambaran petir pada sebuah peralatan listrik memiliki dampak yang singkat tetapi membahayakan kekuatan isolasi pada peralatan tersebut. Sambaran petir menghasilkan nilai tegangan yang sangat besar tetapi memiliki durasi waktu yang singkat atau disebut sebagai tegangan impuls. Tegangan impuls dapat disebabkan juga oleh *switching operation*, *arcing grounds*, gangguan pada sistem oleh berbagai kesalahan, dan lain-lain [2]. Tegangan impuls dapat membahayakan peralatan-peralatan listrik karena tegangan yang dihasilkan jauh lebih tinggi dari tegangan kerja peralatan tersebut. Jika peralatan tidak mampu menahannya, isolasi pada peralatan tersebut akan rusak dan kontinuitas pelayanan daya akan berhenti.

Sambaran petir akan menghasilkan tegangan impuls yang menyebabkan *electrical stress* pada belitan-belitan transformator [3]. *Electrical stress* muncul ketika distribusi tegangan impuls tidak merata pada masing-masing belitan sehingga menyebabkan gangguan internal pada peralatan transformator [3]. Gangguan ini dapat menyebabkan kontinuitas dalam pelayanan daya terganggu sehingga perlu dirancang suatu sistem pengamanan untuk melindungi belitan transformator.

Dalam transformator terdapat beberapa bagian yang harus dilindungi ketika terjadi gangguan berupa tegangan impuls. Salah satu

bagian yang harus dilindungi adalah belitan dalam transformator. Belitan transformator memiliki batasan tegangan yang mampu ditahan saat keadaan normal dan saat terjadi gangguan. Jika kekuatan belitan transformator tidak mampu menahan, maka isolasi belitan akan rusak dan terjadi gangguan dalam transformator tersebut.

Metode yang digunakan pada studi ini adalah dengan memodelkan rangkaian pengganti pada jenis belitan transformator untuk didapatkan nilai kapasitansi pada masing-masing belitan transformator. Jenis belitan yang akan dilakukan permodelan adalah jenis belitan *continuous disk windings* dan *smit windings*. Metode yang digunakan diharapkan dapat membantu untuk lebih memahami jenis-jenis belitan transformator.

Konsep utama dalam memodelkan rangkaian dari masing-masing belitan transformator adalah dengan mengubah rangkaian masing-masing belitan menjadi rangkaian pengganti kapasitansi. Rangkaian kapasitansi muncul ketika diantara dua belitan terdapat sebuah medium atau sela kosong dan mendapatkan tegangan yang mengalir di belitan tersebut.

Masalah yang dibahas dalam studi ini adalah bagaimana mendapatkan nilai kapasitor pada rangkaian kapasitansi di masing-masing jenis belitan transformator. Permasalahan dalam studi dibatasi pada jenis belitan yang digunakan yaitu *continuous disk windings* dan *smit windings* dengan melihat nilai kapasitansi antar belitan (C_s) dan nilai kapasitansi belitan dengan tanah (C_g).

Tujuan yang ingin dicapai pada studi ini adalah mengurangi dampak gangguan impuls yang dapat merusak isolasi pada belitan transformator. Distribusi tegangan impuls dapat tersebar secara merata pada setiap belitan pada transformator.

Metode yang digunakan dalam studi ini pertama-tama adalah pengumpulan data-data yang menunjang penelitian seperti spesifikasi transformator, rangkaian pengganti masing-masing jenis belitan, dan tegangan impuls yang akan digunakan. Metode selanjutnya adalah dengan melakukan pemodelan dan simulasi rangkaian pengganti belitan transformator yang dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ATPDraw. Setelah dilakukan simulasi maka akan didapatkan data-data besar tegangan di masing-masing jenis belitan, besar kapasitansi, dan bentuk gelombang yang dihasilkan pada masing-masing jenis belitan. Metode terakhir adalah dengan melakukan penarikan kesimpulan terhadap data dan analisis yang sudah didapat. Data yang didapatkan dari pemodelan dan simulasi akan dibandingkan dengan data perusahaan yang sudah didapatkan sebelumnya.

1.2 Sistematika Penulisan

Bab 1 membahas mengenai latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika penulisan dan relevansi yang dapat dicapai dalam melakukan penelitian.

Bab 2 membahas mengenai teori transformator dan gelombang impuls yang digunakan dalam pengujian.

Bab 3 membahas mengenai gelombang impuls dan belitan transformator

Bab 4 membahas mengenai analisis data dari hasil simulasi pemodelan, pengolahan data dengan menggunakan *ATPDraw* dan analisis distribusi tegangan di belitan transformator.

Bab 5 berisikan kesimpulan yang dapat diambil dari pengerjaan tugas akhir ini.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

TRANSFORMATOR DAN GELOMBANG IMPULS

2.1 Pengertian Transformator

Transformator merupakan salah satu peralatan listrik yang memiliki peran penting dalam sistem distribusi dan transmisi tenaga listrik. Transformator merupakan peralatan listrik yang tidak memiliki bagian yang bergerak atau berputar (statis) yang berbeda dengan generator atau motor. Fungsi utama dari sebuah transformator digunakan untuk menaikkan (*step up*) ataupun menurunkan (*step down*) level dari suatu tegangan ke level tegangan lainnya [4]. Setiap transformator yang beroperasi dapat digunakan sebagai transformator penaik tegangan (*step up*) maupun penurun tegangan (*step down*) tetapi harus sesuai dengan level tegangan tersebut.

Dalam sistem transmisi, transformator memiliki peran yang penting karena dapat mengubah level tegangan yang diinginkan. Setiap energi yang akan ditransmisikan dari suatu tempat memiliki nilai arus yang lebih kecil pada tegangan tinggi dibandingkan pada tegangan rendah. Hal ini dikarenakan untuk mengurangi kerugian saluran (I^2R) saat mentransmisikan suatu energi. Pada suatu pembangkit, transformator penaik tegangan (*step up*) digunakan pada sistem transmisi tegangan tinggi seperti 34,5 kV. Kemudian energi tersebut akan dikirimkan ke suatu sistem distribusi ataupun ke suatu tempat sehingga nilai tegangan harus diturunkan agar sesuai dengan tegangan nominalnya. Dalam proses menurunkan level tegangan tersebut digunakan transformator penurun tegangan (*step down*) yang mengubah tegangan tinggi menjadi tegangan yang lebih rendah. Dengan adanya transformator, pengiriman energi listrik dengan jarak yang jauh dapat beroperasi secara baik dan ekonomis.

Dalam bentuk yang sederhana, transformator memiliki hanya memiliki dua belitan induktif pada sisi primer dan sekunder yang terpisah secara elektrik tetapi terhubung secara magnetis. Transformator memiliki prinsip kerja memanfaatkan prinsip induksi elektromagnetik. Dalam proses induksi elektromagnetik, terdapat induksi sendiri pada masing-masing belitan transformator dan induksi bersama antar belitan transformator. Pada belitan primer akan diberikan tegangan bolak-balik (AC) yang kemudian akan mengalir arus bolak-balik pada belitan primer dan belitan sekunder. Fluks bolak-balik pun akan muncul dan mengalir

pada inti transformator. Gerak Gaya Listik (GGL) akan terinduksikan dari belitan primer ke belitan sekunder.

Pada transformator ideal, nilai dari Gerak Gaya Listrik (GGL) pada belitan primer sama dengan jumlah lilitan dan perubahan fluks yang berbanding dengan perubahan waktu.

$$e_1 = N \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (2.1)$$

Gaya Gerak Listrik (GGL) yang terinduksi pada belitan sekunder adalah

$$e_2 = N \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (2.2)$$

e = GGL (volt/m (V/m))

N = Jumlah lilitan

$\partial \Phi$ = Arus induksi/fluks (Webber (W))

∂t = Perubahan waktu (s)

Transformator dikatakan ideal apabila tidak terdapat rugi-rugi didalamnya seperti rugi histerisis, rugi arus eddy, dan rugi tembaga sehingga energi listrik yang terinduksikan dari belitan primer ke belitan sekunder memiliki nilai yang sama. Selain itu, transformator ideal tidak terjadi adanya fluks bocor dan tidak terdapat rugi inti. Dengan kata lain, efisiensi dari transformator tersebut yaitu 100%.

Dengan sifat transformator idela, maka fluks pada belitan primer memiliki nilai yang sama dengan fluks yang terdapat di belitan sekunder, sehingga dapat didapatkan rumusan

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (2.3)$$

Berdasarkan persamaan diatas, dikatakan transformator penaik tegangan (*step up*) jika $N_1 < N_2$ dan dikatakan transformator penurun tegangan (*step down*) jika $N_1 > N_2$.

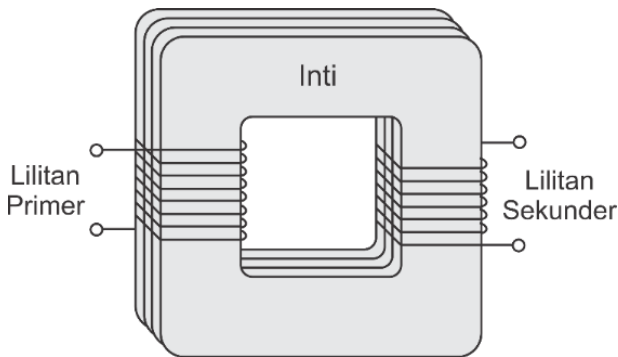
2.2 Bagian-bagian Transformator

2.2.1 Inti Besi

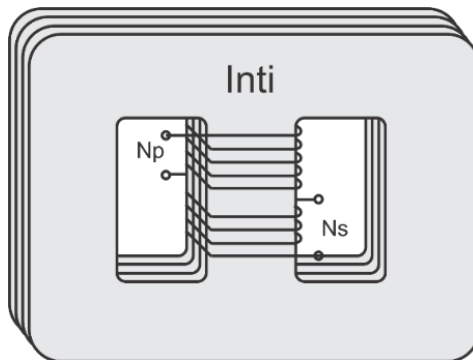
Inti besi pada transformator berfungsi sebagai tempat mengalirnya fluks yang terjadi akibat tegangan bolak-balik pada sisi belitan primer dan sekunder. Inti besi yang digunakan pada transformator umumnya

memiliki bentuk berlapis yang terlamiasi. Selain itu, inti besi pada transformator memiliki dua jenis tipe konstruksi yaitu tipe inti (*core-form*) dan tipe cangkang (*shell-form*).

Transformator dengan tipe inti (*core-form*) memiliki bentuk dengan belitan primer dan belitan sekunder mengelilingi inti seperti pada gambar 2.1. Pada konstruksi transformator jenis ini, fluks magnetik tidak terbagi menjadi dua. Pada transformator dengan konstruksi tipe cangkang (*shell-form*), fluks yang mengalir pada pada inti besi akan membelah menjadi dua yang terlihat pada gambar 2.2. Selain itu, belitan primer dan belitan sekunder dililitkan pada satu inti lengan yang sama secara bersama-sama.



Gambar 2.1 Transformator Tipe Inti



Gambar 2.2 Transformator Tipe Cangkang

2.2.2 Belitan Transformator

Belitan pada transformator merupakan sejumlah lilitan kawat yang memiliki isolasi dan dililitkan pada inti besi transformator. Belitan-belitan pada transformator terbuat dari bahan tembaga dengan berbagai bentuk seperti melingkar atau persegi pipih. Belitan transformator terdiri atas belitan pada sisi primer dan belitan pada sisi sekunder. Belitan sisi primer merupakan belitan yang dihubungkan dengan sumber energi sedangkan belitan sisi sekunder merupakan belitan yang dihubungkan dengan suatu beban. Belitan-belitan pada transformator harus memiliki ketahanan yang kuat terhadap gangguan mekanis ataupun elektrik yang disebabkan oleh gangguan tegangan lebih, tekanan elektrik, ataupun tekanan mekanis. Selain itu, belitan transformator harus terjaga kondisi suhu dan kelembapannya.

Belitan pada sisi primer jika dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, maka akan muncul arus beban nol (I_0) yang mengalir pada belitan sisi primer dimana belitan sisi sekunder tidak dihubungkan dengan beban. Akibat adanya arus beban nol (I_0) maka akan muncul fluks bolak-balik pada inti transformator. Belitan primer dan belitan sekunder akan teraliri fluks bolak-balik ini sehingga akan muncul gaya gerak listrik yang besarnya

$$E_1 = 4,44 f N_1 \phi \text{ (volt)} \quad (2.4)$$

$$E_2 = 4,44 f N_2 \phi \text{ (volt)} \quad (2.5)$$

Menurut persamaan diatas, E_1 merupakan gaya gerak listrik pada belitan primer; E_2 merupakan gaya gerak listrik pada belitan sekunder; N_1 merupakan jumlah lilitan pada belitan primer; N_2 merupakan jumlah lilitan pada belitan sekunder; f merupakan frekuensi tegangan sumber dalam satuan Hz; dan ϕ adalah fluks magnetik pada inti transformator dengan satuan webber.

Penambahan beban pada sisi sekunder akan menimbulkan arus sekunder (I_2). Arah fluks dari arus sekunder berlawanan dengan arah fluks yang ditimbulkan oleh I_0 pada inti transformator sehingga dapat menimbulkan demagnetisasi pada inti transformator. Untuk itu perlu ditambahkan I_1 sehingga

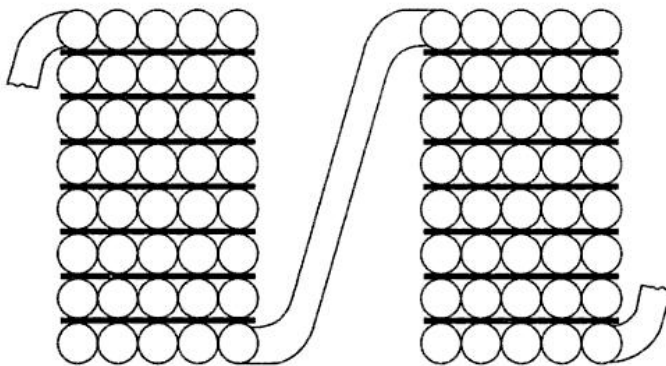
$$N_1 I_0 = N_1 I_1 - N_2 I_2 \quad (2.6)$$

Medan elektrik yang kuat akan terjadi ketika terdapat gaya gerak listrik yang cukup besar akibat dari sumber tegangan tinggi. Untuk itu, isolasi belitan primer pada sisi tegangan tinggi harus mampu menahan tekanan elektrik akibat dari gaya gerak listrik. Selain itu, jika terdapat gangguan berupa tegangan lebih (*overvoltage*) akibat sambaran petir atau proses pensaklaran (*switching*), isolasi dari belitan transformator harus mampu menahan tekanan elektrik karena 60% tegangan yang muncul akibat gangguan tersebut muncul pada 10% panjang dari belitan transformator tersebut [5] Oleh karena itu, dalam menentukan sistem isolasi dari transformator perlu diperhatikan kekuatan dielektrik terhadap medan elektrik yang tinggi sehingga dapat memikul tekanan elektrik ataupun mekanis ketika terjadi gangguan.

Pemilihan jenis belitan yang digunakan dalam penggunaan transformator juga harus diperhatikan. Berikut merupakan beberapa jenis belitan yang digunakan dalam transformator [6]

1. *Distributed Crossover Windings*

Belitan transformator jenis ini hanya dapat beroperasi untuk nilai arus tidak lebih dari 20A. Belitan jenis *distributed crossover windings* terdiri dari lilitan-lilitan kawat yang dililit secara memutar dan bersilang. Lilitan-lilitan dibentuk dan digulung menjadi beberapa gulungan yang bertujuan untuk mengurangi beban tegangan antar lapisan menjadi semakin kecil seperti pada gambar 2.3. Beberapa gulungan kawat disusun secara seri yang dipisahkan dengan sebuah isolator yang berguna sebagai sistem pendinginan.



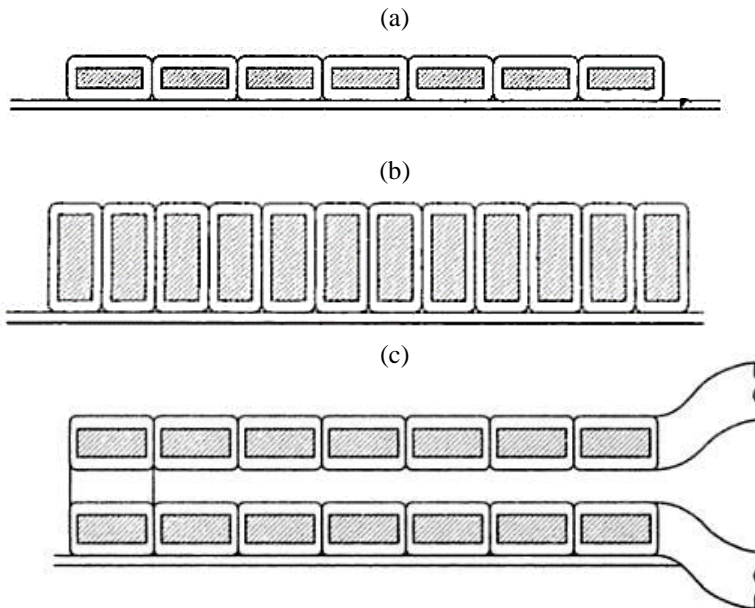
Gambar 2.3 Bentuk Belitan *Distributed Crossover Windings*

2. *Spiral Windings*

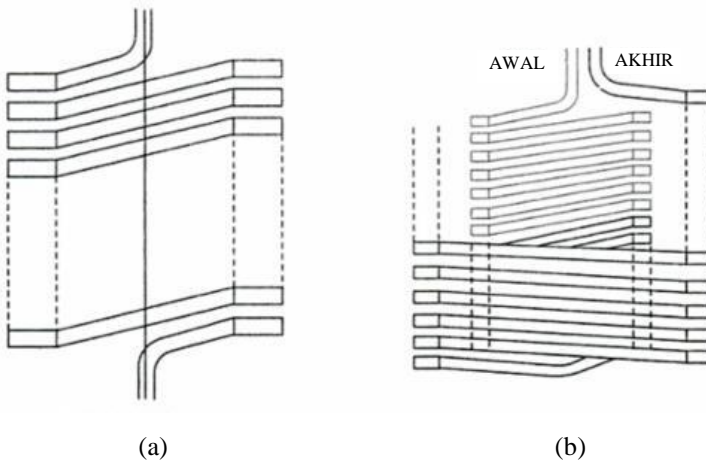
Pada *spiral windings*, tegangan yang dapat beroperasi mencapai 33 kV dengan nilai arus yang rendah. Lilitan konduktor digulung dalam arah yang aksial (tegak lurus) tanpa ada bentuk radial yang memutar antar belitannya. Gulungan spiral biasanya digulung pada sebuah *pressboard* silinder sesuai dengan gambar 2.4. Meskipun biasanya konduktor digulung pada permukaan yang datar, belitan juga digulung di bagian tepi. Namun, ketebalan dari konduktor harus cukup dibandingkan dengan lebarnya sehingga tetap dapat digulung secara baik.

3. *Helical Windings*

Belitan transformator jenis ini digunakan pada tegangan yang rendah dengan nilai arus yang tinggi. Belitan jenis ini memiliki jumlah lilitan yang sedikit dan luas penampang kawat yang besar sehingga arus yang mampu dilewatkan juga memiliki nilai yang cukup besar yaitu lebih dari 100 ampere.

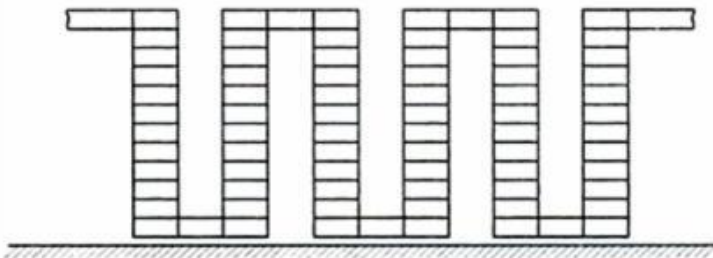


Gambar 2.4 (a) Lilitan Spiral (*Single Layer*), (b) Lilitan Spiral (*Edge Wound*), (c) Lilitan Spiral (*Double Layer*)



Gambar 2.5 (a) *Helical Windings (single layer)*, (b) *Helical Windings (double layer)*

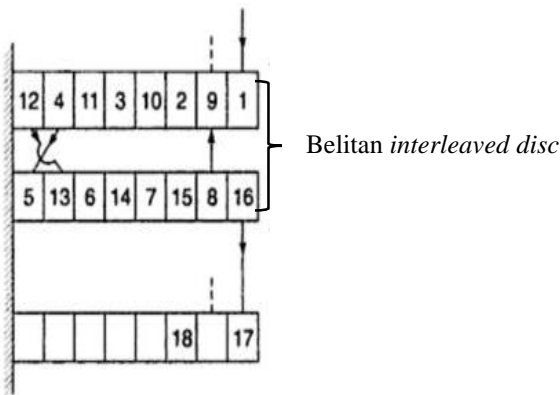
Pada jenis *helical windings*, kawat yang digunakan untuk menjadi belitan memiliki bentuk persegi terlihat pada gambar 2.5. Pemilihan penggunaan bentuk persegi karena memiliki luas penampang yang besar sehingga penggunaan ruang untuk lilitan menjadi lebih efisien, Lilitan dibentuk secara parallel dalam satu belitan. Antara lilitan dibentuk dengan arah aksial dalam satu arah spiral atau helix. Antar lilitan juga dipisahkan oleh saluran sebagai sistem pendinginan.



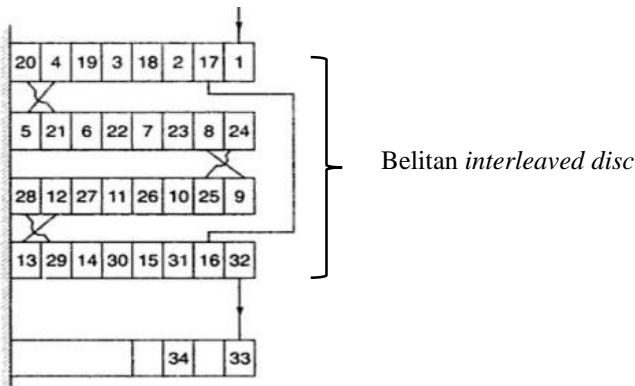
Gambar 2.6 *Continuous Disk Windings*

4. *Continuous Disk Windings*

Jenis belitan *continuous disk windings* digunakan pada level tegangan antara 33 kV – 132 kV. Kawat-kawat dibentuk pada beberapa lilitan yang dibentuk secara aksial dengan adanya saluran pendingin diantara piringan-piringan belitan. Kawat yang digunakan pada jenis belitan ini adalah berbentuk persegi. Kawat dililit pada satu piringan belitan dengan lebih dari satu lilitan. Antara lilitan disusun secara paralel dalam satu piringan (disk) terlihat pada gambar 2.6. Piringan-piringan ini disusun secara seri membentuk satu belitan primer atau sekunder. Antar piringan (disk) terdapat saluran yang berfungsi sebagai sistem pendingin.



Gambar 2.7 *Interleaved Disc Windings (2 disc per group)*



Gambar 2.8 *Interleaved Disc Windings (4 disc per group)*

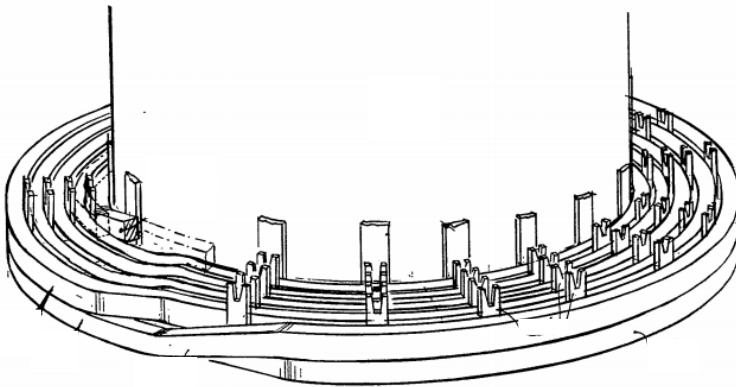
5. *Interleaved Disc Windings*

Belitan jenis *interleaved disc windings* memiliki ketahanan tegangan hingga 145 kV dimana jenis belitan *continuous disc windings* tidak mampu menahan hingga nominal tersebut. Jenis belitan ini memiliki bentuk yang saling menyilang antar piringan (*disk*) seperti pada gambar 2.7 dan gambar 2.8 yang bertujuan untuk menurunkan beban tegangan impuls yang ditanggung oleh belitan-belitan tersebut. Dalam proses produksi, jenis belitan ini memerlukan lebih banyak tenaga kerja dan keahlian di masing-masingnya. Untuk itu, dapat dilakukan sebuah metode penggabungan dengan menggabungkan jenis belitan *interleaved disc windings* dengan *plain disc windings*.

6. *Smit Windings* [7]

Jenis belitan transformator *smit disk winding* merupakan pengembangan dari jenis belitan *disk winding*. Jenis belitan transformator ini memiliki konfigurasi yang sama dengan jenis belitan *continuous disk windings*. Perbedaan pada konfigurasi ini adalah tidak adanya celah udara antar piringan (*disk*) sehingga lapisan piringan ditumpuk secara seri dan berhimpitan seperti pada gambar 2.9.

Proses membelitkan kumparan pada sisi kumparan tegangan tinggi dan sisi kumparan tegangan rendah dilakukan dengan arah aksial yaitu secara tegak lurus. Saluran untuk sistem pendinginan dengan menggunakan minyak dialirkan melalui celah antar lilitan didalam kumparan sisi tegangan rendah dan kumparan sisi tegangan tinggi.



Gambar 2.9 *Smit Windings*

2.2.3 Minyak Transformator

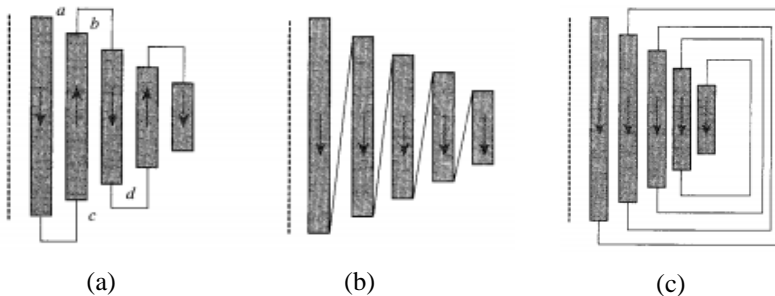
Dalam konstruksi transformator, semua bagian pada inti dan belitan transformator direndam kedalam minyak transformator. Minyak transformator ini memiliki fungsi sebagai isolator dan sebagai sistem pendingin dalam bagian transformator. Dengan kegunaan sebagai pendingin, minyak transformator harus memiliki daya hantar yang baik sehingga panas yang terjadi pada inti dan belitan transformator dapat tersebar secara merata ke medium sekitarnya. Kualitas minyak transformator juga berpengaruh pada umur dan kekuatan dielektrik sistem isolasi dari suatu transformator. Untuk itu, minyak transformator harus memenuhi beberapa syarat sebagai berikut:

1. Memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi.
2. Memiliki daya hantar panas yang baik.
3. Tidak merusak bahan isolasi dan bahan lain pada transformator.
4. Titik nyala yang tinggi yang berpengaruh pada penguapan minyak.
5. Tingkat kekentalan yang rendah. Tingkat kekentalan yang rendah akan membuat minyak menjadi encer sehingga dapat mudah dialirkan dan bersirkulasi.

2.3 Susunan Dan Penyambungan Belitan [8]

Belitan pada transformator akan mendapatkan tegangan lebih saat terjadi gangguan tegangan lebih seperti sambaran petir atau proses pensaklaran (*switching*). Untuk itu, belitan transformator harus disusun secara detail agar transformator mampu beroperasi dengan baik.

Secara umum, transformator disusun oleh dua bentuk jenis belitan yaitu belitan berjenis piringan (*disk windings*) dan belitan berjenis silindris (*cylindrical windings*). Pada belitan berjenis piringan, belitan transformator dibelitkan pada suatu inti transformator. Pada belitan berjenis silindris, belitan transformator dibelitkan pada semua kaki inti transformator. Dalam penyusunannya, belitan-belitan transformator harus disusun secara simetris. Belitan pada transformator harus mampu menahan tekanan elektrik dan tekanan mekanis sehingga distribusi tegangan dapat tersebar secara merata pada masing-masing belitan. Dengan tersebar secara merata, isolasi pada belitan transformator mampu menahan gangguan tegangan lebih. Proses penyusunan belitan transformator terdiri dari penyusunan belitan bertindih dan penyusunan belitan berlapis.



Gambar 2.10 Penyusunan Belitan Berlapis

2.3.1 Penyusunan Belitan Bertindih

Dalam penyusunan belitan bertindih, semua ukuran dari komponen penyusun belitan bertindih dibuat dengan spesifikasi yang sama. Komponen penyusun ini adalah jarak antar konduktor dan belitan-belitan konduktor transformator. Konduktor penghubung digunakan untuk menghubungkan konduktor-konduktor yang telah dihubungkan secara seri. Konduktor penghubung ini menghubungkan belitan-belitan konduktor secara bersilang atau secara berurut.

Pada konduktor penghubung bersilang, konduktor penghubung akan melewati sebuah ruang dalam menghubungkan satu konduktor dengan konduktor lainnya. Dalam prosesnya, hubungan bersilang ini akan menimbulkan masalah dalam bagian isolasi konduktor penghubung. Namun, beda potensial antara belitan satu dengan belitan lainnya dengan jarak yang sama memiliki nilai beda potensial yang sama.

Pada konduktor penghubung berurut, konduktor penghubung tidak akan melewati ruang dalam menghubungkan konduktor satu dengan lainnya. Selain itu, tidak terjadi masalah dalam bagian isolasi konduktor penghubungnya. Namun, beda potensial antara satu titik pada belitan konduktor dengan satu titik dengan belitan konduktor lainnya dengan jarak yang sama memiliki nilai beda potensial yang berbeda-beda. Nilai beda potensial ini antara nol sampai dua kali tegangan belitan konduktor.

2.3.2 Penyusunan Belitan Berlapis

Dilihat dari arah belitan, susunan belitan tegangan tinggi pada suatu transformator daya dibagi atas dua jenis, yaitu:

1. Arah belitan berlawanan (gambar 2.10a). Dalam hal ini, susunan dari belitan transformator yang saling berdampingan memiliki arah yang berlawan sehingga arah gaya gerak listrik pada kedua belitan transformator menjadi berlawanan.
2. Arah belitan sama (gambar 2.10b dan 2.10c). Dalam hal ini, susunan dari belitan transformator yang saling berdampingan memiliki arah yang sama sehingga arah gaya gerak listrik pada setiap belitan sama.

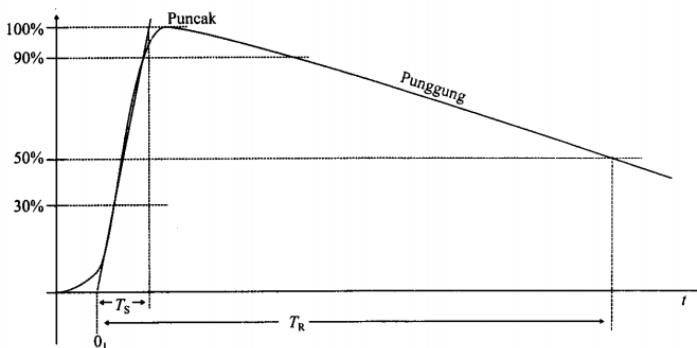
Dalam penyusunan belitan berlapis, beda potensial antara belitan satu dengan belitan lainnya dengan jarak yang berdekatan harus diperhatikan dengan baik. Untuk penyusunan dengan arah belitan yang berlawanan, beda potensial yang terjadi memiliki nilai yang berlipat ganda.

2.4 Gelombang Impuls

2.4.1 Pengertian Gelombang Impuls [9]

Peralatan listrik yang beroperasi pada sistem tenaga listrik sering mengalami berbagai gangguan-gangguan. Salah satu gangguan yang sering terjadi berupa tegangan lebih impuls. Tegangan lebih impuls merupakan tegangan yang muncul sesaat dengan nilai tegangan yang sangat tinggi. Tegangan lebih impuls dapat bersumber dari sambaran petir yang disebut dengan impuls petir dan bersumber dari proses buka tutup kontak (*switching*) yang disebut impuls kontak.

Bentuk dari standar tinggi impuls petir adalah sebagai berikut.



Gambar 2.11 Standar Tegangan Impuls Petir

Terjadi gangguan lebih tegangan impuls pada sistem tenaga listrik dapat disebabkan oleh:

1. Sambaran kilat langsung pada kawat transmisi
2. Sambaran kilat tidak langsung pada kawat transmisi
3. Operasi pemutusan saklar (*switching operation*)
4. Busur tanah (*arching ground*)

Semua macam sebab-sebab diatas menyebabkan adanya surja (*surge*) pada kawat yaitu surja dan arus tegangan. Dari sudut energi, gangguan tegangan lebih yang timbul akibat sebab-sebab diatas akan memberikan energi yang tinggi secara tiba-tiba ke sistem. Energi yang tiba-tiba ini memiliki nilai yang sangat besar dengan waktu yang singkat. Energi ini akan merambat ke sistem tenaga listrik yang terdiri dari arus dan tegangan. Kecapatan merambat gelombang berjalan bergantung pada konstanta yang terdapat pada sistem.

Bentuk umum dari suatu gelombang impuls adalah tegangan yang naik dengan waktu yang sangat singkat dengan nilai tegangan yang tinggi kemudian gelombang tersebut akan turun secara melambat menuju nilai nol. Bentuk gelombang seperti itu memiliki persamaan sebagai berikut

$$V = V_0(e^{-at} - e^{bt})$$

dimana,

V_0 = Konstanta tegangan mula

a dan b = Konstanta waktu

Konstanta a dan b merupakan konstanta yang dapat diubah-ubah sesuai dengan bentuk gelombang impuls yang ingin dibuat. Nilai puncak merupakan nilai maksimum dari tegangan impuls (*peak* atau *crest*). Sedangkan muka gelombang (*wave front*) dan ekor gelombang (*wave tail*) dapat ditetapkan dalam standar sedemikian rupa.

2.4.2 Karakteristik Gelombang Impuls

Karakteristik dari bentuk umum gelombang impuls seperti pada gambar 2.11 memiliki spesifikasi gelombang sebagai berikut:

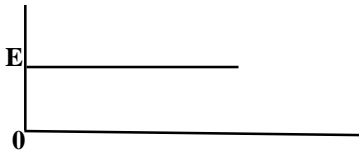
1. Puncak gelombang (*crest*) merupakan nilai maksimal pada gelombang impuls
2. Muka gelombang (T_s) merupakan waktu dari permulaan gelombang sampai mendekati puncak gelombang. Pada gelombang impuls diambil nilai 10% sampai 90% nilai tegangan impuls.

3. Ekor gelombang (T_R) merupakan bagian dibelakang puncak gelombang impuls. Waktu yang diambil yaitu pada 50% dari waktu permulaan hingga punggung gelombang.
4. Polaritas dari gelombang impuls adalah polaritas positif atau negatif.

Gelombang berjalan memiliki berbagai bentuk gelombang sesuai dengan jenis gelombang impuls. Bentuk gelombang ini dipengaruhi oleh impedansi dari sistem tersebut [10]:

- a. Gelombang Persegi yang Sangat Panjang

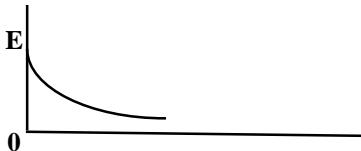
$$\begin{aligned} a &= 0 \\ b &= \infty \\ e &= E \end{aligned}$$



Gambar 2.12 Bentuk Gelombang Persegi yang Sangat Panjang

- b. Gelombang Eksponensial

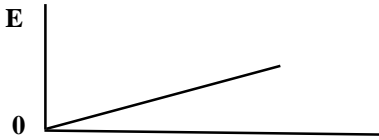
$$\begin{aligned} a &= 0 \\ b &= \infty \\ e &= Ee^{at} \end{aligned}$$



Gambar 2.13 Bentuk Gelombang Eksponensial

- c. Gelombang dengan Muka Linier

$$\begin{aligned} a &= 0 \\ b &= \infty \\ E &= \infty \\ e &= E(1 - e^{-at}) \end{aligned}$$



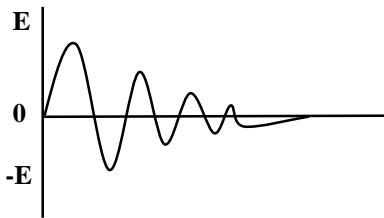
Gambar 2.14 Bentuk Gelombang dengan Muka Linier

d. Gelombang Sinus Teredam

$$a = \alpha - j\omega$$

$$b = \beta + j\omega$$

$$E = E e^{-\alpha t} \sin \omega t$$



Gambar 2.15 Bentuk Gelombang Sinus Teredam

2.5 Basic Insulation Level (BIL)

Ketika terjadi gangguan tegangan lebih yang bersumber dari sambaran petir, isolasi dari peralatan listrik harus mampu menahan gangguan lebih tersebut agar kontinuitas pelayanan daya dapat berjalan dengan baik. Oleh karena itu, perlu adanya pengujian peralatan listrik untuk menahan gangguan tegangan lebih tersebut. Pengujian menahan tegangan lebih menggunakan tegangan impuls sebagai sumber tegangannya. Dengan karakteristik tegangan impuls yang memiliki nilai amplitud tegangan yang tinggi dan waktu yang singkat, peralatan listrik harus mampu bertahan dengan nilai tegangan impuls yang diberikan. Standar batas tegangan minimum peralatan terhadap tegangan impuls ini dinamakan *Basic Insulation Level* (BIL). BIL merupakan ketentuan tegangan minimum dari peralatan listrik dalam menahan gangguan tegangan lebih untuk koordinasi isolasi. Ketika terjadi gangguan tegangan lebih yang sangat besar secara tiba-tiba, kekuatan isolasi dari peralatan listrik pada sistem tenaga listrik harus menahan gangguan tersebut bahkan sebaiknya melebihi dari tingkat yang telah ditentukan.

Kekuatan isolasi dari peralatan listrik harus dibuat dengan baik agar isolasi tersebut tidak rusak ketika terjadi gangguan tegangan lebih. BIL merupakan standar pada peralatan listrik untuk menentukan kualitas dielektrik dan dinyatakan dalam pengujian gangguan dengan tegangan tertinggi. Standar internasional yang digunakan dalam pengujian peralatan listrik adalah IEC 60076-3 seperti dalam tabel 2.1. Dalam tabel 2.1, standar IEC 60076-3 menjelaskan mengenai nilai tegangan dari peralatan dengan nilai tegangan impuls petir yang diberikan ketika dilakukan pengujian isolasinya. Berikut merupakan ketentuan-ketentuan dari standar IEC 60076-3 [11]

Tabel 2.1 Standar IEC 60076-3

Highest Voltage for Equipment	Full Wave Lightning Impulse	Switching Impulse	Minimum air clearance	
			Line to earth	Phase to phase
Um kV	(LI) Kv	(SI) KV	mm	mm
<1,1	-	-		
3,6	20	-	60	60
	40	-	60	60
7,2	60	-	90	90
	75	-	120	120
12	75	-	120	120
	95	-	160	160
	110	-	200	200
17,5	95	-	160	160
	125	-	220	220
24	125	-	220	220
	145	-	270	270
	150	-	280	280
36	170	-	320	320
	200	-	380	380

Tabel 2.1 Standar IEC 60076-3 (lanjutan)

Highest Voltage for Equipment	Full Wave Lightning Impulse	Switching Impulse	Minimum air clearance	
			Line to earth	Phase to phase
Um kV	(LI) Kv	(SI) KV	mm	mm
52	250	-	480	480
72,5	325	-	630	630
	350	-	630	630
100	450	375	900	900
123	550	460	1100	1100
145	550	460	1100	1100
	650	540	1300	1500
170	650	540	1300	1500
	750	620	1500	1700
245	850	700	1600	2100
	950	750	1700	2300
	1050	850	1900	2600
300	950	750	1700	2300
	1050	850	1900	2600
362	1050	850	1900	2600
	1175	950	2200	3100
420	1175	950	2200	3100
	1300	1050	2600	3600
	1425	1175	3100	4200
550	1300	1050	2600	3600
	1425	1175	3100	4200
	1550	1300	3600	5000
	1675	1390	4000	5600

Tabel 2.1 Standar IEC 60076-3 (lanjutan)

Highest Voltage for Equipment	Full Wave Lightning Impulse	Switching Impulse	Minimum air clearance	
			Line to earth	Phase to phase
Um kV	(LI) Kv	(SI) KV	mm	mm
800	1800	1425	4200	5800
	1950	1550	4900	6700
	2050	1700	5800	7900
	2100	1675	5600	7700
1100	1950	1425	-	-
	2250	1800	6300	-
1200	2250	1800	6300	-

BAB 3

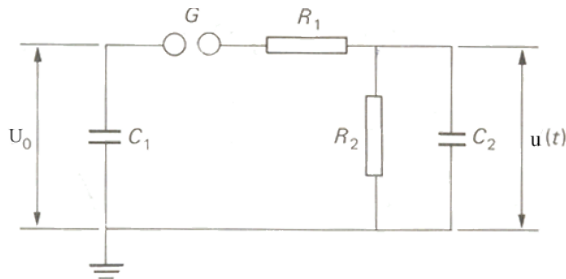
GELOMBANG IMPULS DAN BELITAN TRANSFORMATOR

3.1 Gelombang Impuls

Pada tugas akhir ini, tegangan impuls memiliki durasi sebesar $1,2/50 \mu\text{s}$. Dengan $T_S = 1,2 \mu\text{s}$ dan $T_R = 50 \mu\text{s}$. T_S diperoleh dari 1,67 kali rentang durasi antara 30% dan 90% nilai tegangan. T_R merupakan waktu ekor atau punggung antara mulai waktu impuls sampai dengan 50% nilai tegangan pada punggung impuls. Tidak digunakan nilai 10% karena sampai pada 10% tegangan sering terjadi osilasi [12].

Tegangan impuls yang digunakan pada tugas akhir ini sebesar 325 kV dan 650 kV. Penggunaan tegangan impuls ini berdasarkan dengan standarisasi internasional tegangan impuls yaitu IEC 60 sesuai tabel 2.1. Transformator yang digunakan memiliki nilai nominal tegangan sebesar 66 kV dan 150 kV. Dengan nilai sebesar 66 kV dan 150 kV, tegangan uji yang digunakan pada standar internasional IEC60 dan pada perusahaan PT Bambang Djaja yaitu 325 kV dan 650 kV. Gambar 3.1 merupakan permodelan pembangkitan tegangan impuls dengan tegangan impuls yang dibangkitkan sebesar 325 kV dan 650 kV.

Standarisasi internasional yang digunakan pada tugas akhir ini mengacu pada standar IEC60 mengenai tegangan impuls. Dalam standar IEC60, tegangan impuls memiliki berbagai nilai tegangan bergantung pada nilai tegangan nominal peralatan tersebut. Standarisasi internasional tersebut yaitu *Basic Impulse Insulation Level (BIL)*. BIL merupakan nilai puncak dari tegangan impuls yang diujikan pada transformator sesuai dengan nilai tegangan nominal transformator tersebut. BIL digunakan



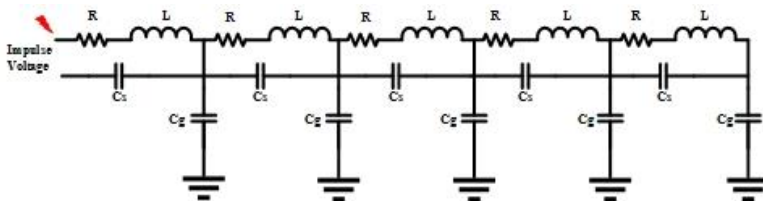
Gambar 3.1 Permodelan Pengujian Belitan Transformator

sebagai pemodelan gangguan petir yang akan memberikan tegangan lebih pada peralatan tegangan listrik, Gangguan tegangan lebih ke peralatan listrik tegangan tinggi harus disesuaikan dengan tegangan kerja dari peralatan listrik tersebut. Jika peralatan listrik tersebut dapat menahan tegangan impuls yang diberikan, maka isolasi pada peralatan listrik tegangan tinggi bekerja dengan baik dan dapat dioperasikan baik ketika mendapatkan gangguan maupun tanpa terjadi gangguan.

3.2 Belitan Transformator

Kekuatan isolasi pada belitan transformator berpengaruh pada kemampuan ketahanan transformator dalam menahan gangguan tegangan lebih. Transformator memiliki belitan pada sisi tegangan primer dan sisi tegangan sekunder. Lilitan-lilitan akan dibentuk secara memutar pada inti transformator. Lilitan ini kemudian direndam oleh minyak transformator. Minyak transformator berfungsi sebagai sistem pendinginan yang akan mengisi sela-sela dalam belitan transformator.

Dalam rangkaian pengganti seperti pada gambar 3.2, komponen penyusun dari belitan transformator yaitu komponen induktansi, resistansi, dan kapasitansi. Belitan yang terdiri dari konduktor yang dililitkan akan membentuk rangkaian induktansi dan resistansi karena pada konduktor memiliki resistansi walaupun nilainya sangat kecil. Nilai kapasitansi muncul ketika konduktor mendapatkan tegangan dan terdapat medium diantaranya. Terdapat dua nilai kapasitansi yang muncul dari belitan transformator yaitu nilai kapasitansi seri (C_s) yaitu nilai kapasitansi yang muncul dari dua konduktor yang disusun secara seri dan nilai kapasitansi ground (C_g) yaitu nilai kapasitansi yang muncul antara konduktor dengan *ground* (tanah).

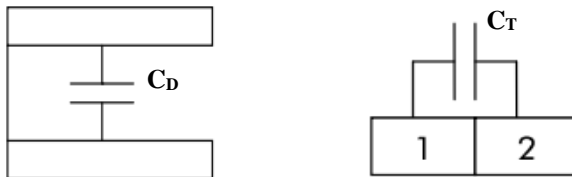


Gambar 3.2 Rangkaian Pengganti Belitan Transformator [2]

Belitan transformator memiliki berbagai jenis sesuai dengan penggunaannya. Jenis-jenis belitan transformator yang digunakan pada tugas akhir ini adalah

3.2.1 *Continuous Disk Windings*

Continuous disk windings merupakan salah satu jenis belitan yang memiliki bentuk lilitan yang berkeping-keping (*disk*). Lilitan-lilitan pada sisi tegangan primer dan sekunder dibentuk memutar mengelilingi inti transformator. Lilitan-lilitan konduktor disusun secara seri antara satu dengan yang lain. Dalam satu piringan (*disk*), jumlah lilitan yang disusun seri memiliki jumlah antara tujuh sampai 10 lilitan. Pada jenis belitan *continuous disk winding*, lilitan konduktor yang sudah tersusun secara seri kemudian disatukan menjadi satu piringan (*disk*). Jumlah piringan (*disk*) dalam satu sisi primer transformator adalah antara tujuh puluh hingga delapan puluh piringan (*disk*). Piringan belitan ini kemudian disusun secara paralel antara satu dengan yang lain. Dalam penyusunannya, antar



Gambar 3.3 Permodelan Kapasitansi Belitan *Continuous Disk Windings* [13]

piringan-piringan yang berisi belitan konduktor diberikan saluran berupa sela kosong (*duct*). Jumlah dari sela kosong ini adalah antara enam puluh sembilan sampai sembilan puluh sembilan. Sela antara piringan satu dengan yang lain ini akan diisi oleh minyak transformator setelah direndam minyak transformator sebagai salah satu media pendingin transformator.

Berdasarkan gambar 3.3, permodelan belitan pada transformator akan memunculkan kapasitansi liar (*stray capacitance*). Kapasitansi liar ini bersifat parasit karena akan mempengaruhi nilai tegangan kerja dari suatu peralatan. Kapasitansi liar muncul ketika dua konduktor yang memiliki jarak tertentu dan dialiri tegangan dengan terdapatnya medium pemisah antara dua konduktor tersebut.

Kapasitansi pada jenis belitan *continuous disk winding* terdiri dari C_D (*capacitance inter-disk*) dan C_T (*capacitance inter-turn*). C_D merupakan kapasitansi yang muncul antara piringan (*disk*) yang satu dengan piringan (*disk*) selanjutnya. Munculnya kapasitansi C_D karena terdapat sela kosong antara *disk* satu dengan *disk* selanjutnya yang akan terisi oleh minyak transformator sebagai media pendinginnya.

C_T merupakan kapasitansi yang muncul antar lilitan dalam satu *disk*. Dalam proses melilitkan konduktor dalam satu *disk*, lilitan yang terpasang antara satu konduktor dengan yang lain memiliki sela antar lilitan yang sangat kecil tetapi akan tetap memberikan pengaruh kapasitansi terhadap belitan keseluruhan pada transformator sehingga jenis belitan *continuous disk windings* memiliki kapasitansi keseluruhan yang terdiri dari kapasitansi antar *disk* (C_D) dan kapasitansi antar lilitan dalam satu *disk* (C_T).

Dalam perhitungannya, C_D dan C_T memiliki rumus matematis sebagai berikut [13]

$$C_D = \frac{\varepsilon_0(\pi D)r}{\left[\frac{t_D}{f\varepsilon_M + (1-f)\varepsilon_D} + \left(\frac{t_C}{\varepsilon_C} \right) \right]} \quad (3.1)$$

$$C_T = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_C(\pi D)(h + t_C)}{t_C} \quad (3.2)$$

dimana,

- ε_0 = Permittivitas pada udara bebas (F/m)
- ε_C = Permittivitas pada isolasi konduktor (F/m)
- ε_D = Permittivitas pada isolasi di saluran (F/m)
- ε_M = Permittivitas pada medium sekitar di saluran (F/m)
- D = Diameter pada belitan (m)
- r = Jari-jari pada belitan (m)
- t_C = Ketebalan isolasi konduktor (m)
- t_D = Ketebalan saluran antar *disk* (m)
- f = Rasio antara luasan yang tertitip oleh isolasi dan tidak berisolasi
- h = Diameter konduktor tanpa isolasi (m)
- N = Jumlah *disk* pada satu transformator
- n = Jumlah lilitan tiap satu *disk*
- n_A = Jumlah saluran pada satu transformator

Sehingga kapasitansi seri (C_S) pada satu piringan (*disk*) transformator jenis belitan *continuous disk windings* adalah sebagai berikut

$$C_S = \left(\frac{n - n_A - 1}{n^2} \right) C_T + \left(\frac{4}{3} \right) C_D \quad (3.3)$$

Berdasarkan rumus diatas, total kapasitansi seri (C_S) dipengaruhi oleh nilai kapasitansi C_D dan C_T . Nilai C_S pada satu jenis belitan transformator memiliki nilai yang sama antara satu disk dengan yang lain.

Selain adanya kapasitansi seri antar piringan (C_S), rangkaian pengganti belitan transformator juga terdapat kapasitansi belitan dengan tanah (C_G). Kapasitansi belitan dengan tanah (C_G) merupakan kapasitansi antara belitan piringan (*disk*) terhadap tanah. C_G dipengaruhi oleh ketinggian dari badan transformator dengan tanahnya. C_G dapat dihitung dengan perhitungan matematis sebagai berikut:

$$C_g = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{bd}{ac}} \epsilon_c l \quad (3.4)$$

dimana,

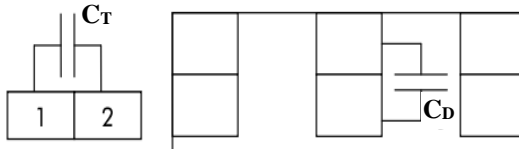
- a = Jari-jari lebar inti besi (m)
- b = Jari-jari bagian dalam belitan tegangan rendah (m)
- c = Jari-jari bagian luar belitan tegangan tinggi (m)
- d = Jari-jari bagian dalam belitan tegangan tinggi (m)
- l = Panjang aksial belitan tegangan tinggi (m)
- ϵ_0 = Permittivitas pada udara bebas (F/m)
- ϵ_c = Permittivitas pada isolasi konduktor (F/m)

Ketinggian tanah dengan belitan piringan (*disk*) akan memiliki nilai yang berbeda-beda sesuai dengan tingginya belitan piringan.

3.2.2 *Smit Windings*.

Jenis belitan *smit windings* merupakan salah satu jenis belitan yang memiliki bentuk piringan (*disk*). Jenis belitan ini memiliki nilai tegangan kerja yang tinggi daripada jenis belitan *continuous disk windings*. Bentuk dan struktur jenis belitan ini memiliki kesamaan dengan jenis belitan *continuous disk windings* tetapi perbedaan hanya dari jumlah piringan (*disk*) dan penyusunan antar piringan belitannya.

Jumlah piringan (*disk*) dari jenis belitan ini lebih banyak dari jenis belitan *continuous disk windings* yaitu antara seratus hingga seratus sepuluh. Dalam jenis *smit windings*, jumlah dari lilitan konduktor yang disusun secara seri berjumlah antara tujuh hingga sepuluh dengan jumlah saluran antara enam sampai sembilan. Penyusunan sela kosong yang digunakan sebagai sela pengisi minyak transformator disusun antara lilitan-lilitan konduktor dalam satu piringan (*disk*) sehingga terdapat jarak antar lilitan-lilitan konduktor dalam satu piringan (*disk*).



Gambar 3.4 Permodelan Kapsitansi Belitan Smit Windings [13]

Berdasarkan gambar 3.4, permodelan kapasitansi belitan akan menimbulkan terjadinya kapasitansi liar (*stray capacitance*) seperti halnya pada jenis belitan *continuous disk windings*. Perbedaan yang terlihat hanya pada kapasitansi yang muncul pada kapasitansi antar piringan (C_D). C_D merupakan kapasitansi yang muncul antara disk (*inter disk*) tetapi karena jenis belitan ini memiliki bentuk aksial dan sela kosong berada diantara lilitan dalamnya, maka rumus matematis untuk mendapatkan nilai C_D dan C_T sebagai berikut:

$$C_D = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_C (\pi D) (r - n_{AWAD})}{t_C} \quad (3.5)$$

$$C_T = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_C (\pi D) (h + t_C)}{t_C} \quad (3.6)$$

dimana,

- ε_0 = Permittivitas pada udara bebas (F/m)
- ε_C = Permittivitas pada isolasi konduktor (F/m)
- D = Diameter pada belitan (m)
- r = Jari-jari pada belitan (m)
- t_C = Ketebalan isolasi konduktor (m)
- h = Diameter konduktor tanpa isolasi (m)

- N = Jumlah *disk* pada satu transformator
 n = Jumlah lilitan tiap satu *disk*
 n_A = Jumlah saluran pada satu transformator
 w_{AD} = Lebar saluran aksial (m)

Sehingga, kapasitansi seri (C_s) pada jenis belitan *smit disk windings* dapat dirumuskan sebagai berikut

$$C_s = \left(\frac{1}{N}\right) \left(\frac{n - n_A - 1}{n^2}\right) C_T + \left(\frac{4}{3}\right) \left(\frac{N - 1}{N^2}\right) C_D \quad (3.7)$$

Berdasarkan rumus diatas, kapasitansi seri (C_s) pada jenis belitan *smit windings* juga dipengaruhi oleh nilai C_T dan C_D dengan nilai C_s yang sama dimasing-masing belitan.

Selain dipengaruhi oleh kapasitansi seri (C_s), belitan pada transformator juga dipengaruhi oleh kapasitansi antara belitan piringan dengan tanah (C_g). C_g pada jenis belitan *smit windings* memiliki rumus matematis yang sama dengan jenis belitan *continuous disk windings* yaitu sebagai berikut

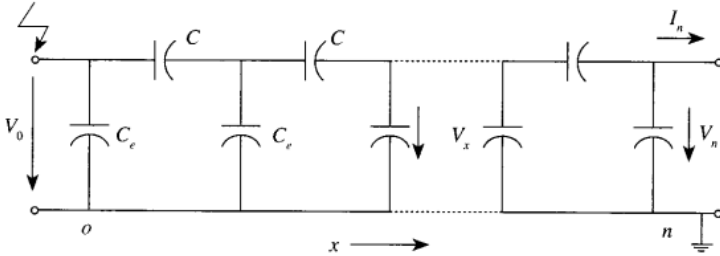
$$C_g = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{bd}{ac}} \epsilon_c l \quad (3.8)$$

dimana,

- a = Jari-jari lebar inti besi (m)
 b = Jari-jari bagian dalam belitan tegangan rendah (m)
 c = Jari-jari bagian luar belitan tegangan tinggi (m)
 d = Jari-jari bagian dalam belitan tegangan tinggi (m)
 l = Panjang aksial belitan tegangan tinggi (m)
 ϵ_0 = Permittivitas pada udara bebas (F/m)
 ϵ_c = Permittivitas pada isolasi konduktor (F/m)

3.2.3 Distribusi Tegangan Belitan

Belitan transformator terdiri dari beberapa komponen seperti komponen resistansi (R), induktansi (L), dan kapasitansi (C). Kapasitansi pada belitan transformator terdiri dari kapasitansi yang dibentuk satu belitan dengan belitan lain (C_s) dan kapasitansi antara belitan dengan inti besi terhadap tanah (C_g). Jika terjadi gangguan lebih tiba-tiba berupa



Gambar 3.5 Rangkaian Ekuivalen Belitan Transformator

sambaran petir yang mengenai terminal transformator, maka pada belitan tegangan tinggi akan terjadi gelombang berjalan. Gelombang berjalan ini akan menyebabkan osilasi tegangan yang dapat menimbulkan tekanan listrik pada belitan transformator.

Rangkaian pada gambar 3.5 merupakan rangkaian ekuivalen sederhana dari belitan transformator. Jika pada terminal belitan tegangan tinggi diberikan suatu tegangan impuls (V_0), maka hanya kapasitansi jaringan yang diasumsikan berperan. Jika titik netral dibumikan ($V_R=0$), maka perhitungan distribusi tegangan sepanjang belitan memiliki rumusan sebagai berikut

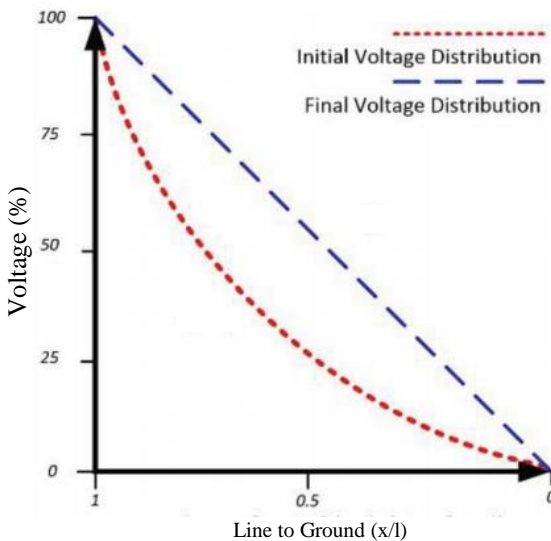
$$V_x = V_0 \frac{\sinh(n-x)\alpha}{\sinh n\alpha} \quad (3.9)$$

Jika titik netral diisolasi (tidak dibumikan, $I_N = 0$), maka distribusi tegangan sepanjang belitan adalah:

$$V_x = V_0 \frac{\cosh(n-x)\alpha}{\cosh n\alpha} \quad (3.10)$$

dalam hal ini

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_G}{C_S}} \quad (3.11)$$



Gambar 3.6 Distribusi Tegangan Belitan Transformator

Berdasarkan gambar 3.6, distribusi tegangan impuls pada belitan transformator ketika $t=0$ adalah tidak merata. Pada awal terjadinya gangguan gelombang impuls, tegangan akan dipikul oleh beberapa belitan. Selama durasi terjadinya gangguan tegangan lebih, penyimpangan distribusi tegangan awal akan terus berlangsung hingga tercapai distribusi tegangan akhir.

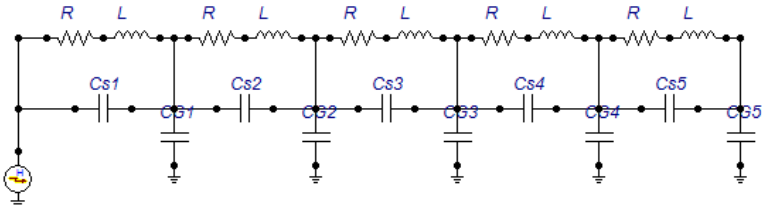
Meredam osilasi dengan memperbesar resistansi belitan tidak dilakukan karena hal itu akan memperbesar rugi-rugi tembaga transformator. Jika perbedaan distribusi tegangan awal dengan distribusi tegangan akhir semakin kecil, maka kemungkinan terjadinya osilasi juga akan semakin kecil. Untuk itu, perlu didesain agar nilai kapasitansi antar belitan dan nilai kapasitansi terhadap tanah dengan baik. Nilai kapasitansi antar belitan harus dibuat sebesar mungkin agar nilai α mendekati nilai distribusi tegangan akhir.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

HASIL DAN ANALISA DATA

Dalam memodelkan rangkaian pengganti dari belitan transformator, komponen-komponen seperti komponen induktansi, kapasitansi, dan resistansi menjadi penyusun dari rangkaian ini.



Gambar 4.1 Komponen penyusun belitan transformator

Dalam mensimulasikan belitan transformator pada program ATPDraw, beberapa parameter dibutuhkan untuk mendapatkan nilai-nilai dari masing-masing komponen di rangkaian pengganti belitan transformator. Komponen pada Gambar 4.1 yaitu komponen resistansi dan induktansi yang dipasang secara seri. Komponen Cs1, Cs2, Cs3, Cs4, Cs5 merupakan rangkaian kapasitansi antar piringan (*disk*) dan CG1, CG2, CG3, CG4, dan CG5 merupakan rangkaian kapasitansi belitan dengan tanah. Komponen-komponen tersebut akan terdapat pada jenis belitan *continuous disk windings* dan *smit disk windings*

4.1 Parameter Komponen Penyusun Belitan Transformator

4.1.1 *Continuous Disk Windings*

Berikut ini merupakan data-data belitan transformator untuk jenis belitan *continuous disk windings* yang didapatkan dari PT. Bambang Djaja

30 MVA 66 kV 22 kV YNyn0 50 Hz (*Disc winding*)

Core diameter : 5590 mm

Inner LV diameter : 570 mm

Inner HV diameter : 866 mm

Outer HV diameter : 1118 mm

Axial length of HV winding : 1311 mm

Blank HV wire dimension :

- *axial / radial* = 15,3 x 16,9 mm (*insulation thickness*: 0,6 mm)
- *Axial: height of conductor, radial: thickness of conductor*

HV winding : Disc type

- *No. Of disc* : 70 disc
- *Turns/disc* : 7 turns
- *No. of radial canal* : 69 pcs (@1 pcs 3mm thickness/*t_D*)
- *Radial dimension* : 126 mm

Data tersebut digunakan untuk mendapatkan nilai kapasitansi antar belitan (C_S) dan kapasitansi belitan dengan tanah (C_G). Kaspitansi antar belitan (C_S) dipengaruhi oleh kapasitansi antar lilitan (C_T) dan kapasitansi antar disk (C_D). Nilai C_T dan C_D dapat dicari dengan menggunakan rumusan matematis

$$C_D = \frac{\varepsilon_0(\pi D)r}{\left[\frac{t_D}{f\varepsilon_M + (1-f)\varepsilon_D} + \left(\frac{t_C}{\varepsilon_C} \right) \right]}$$

$$C_D = \frac{(8,85419 \times 10^{-12})(0,992\pi)0,126}{\left[\frac{0,003}{(0,7 \times 2,25) + (1 - 0,7)4,2} + \left(\frac{0,0006}{3,2} \right) \right]}$$

$$C_D = 2,78963 \text{ nF}$$

$$C_T = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_C (\pi D)(h + t_C)}{t_C}$$

$$C_T = \frac{(8,85419 \times 10^{-12})(3,2)(0,992\pi)(0,0153 + 6 \times 10^{-4})}{6 \times 10^{-4}}$$

$$C_T = 2,33876 \text{ nF}$$

Sehingga didapatkan kapasitansi antar belitan (C_S) dengan menggunakan rumus matematis sebagai berikut

$$C_S = \left(\frac{n - n_A - 1}{n^2} \right) C_T + \left(\frac{4}{3} \right) C_D$$

$$C_S = \left(\frac{7 - 69 - 1}{7^2} \right) (2,33876 \times 10^{-9}) + \left(\frac{4}{3} \right) (2,78963 \times 10^{-9})$$

$$C_S = 0,712529 \text{ nF}$$

Selain dipengaruhi oleh kapasitansi antar belitan (C_S) yang terdiri dari C_T (*capacitance inter-turn*) yaitu kapasitansi yang muncul diantara lilitan-lilitan di dalam satu piringan belitan transformator dan C_D (*capacitance inter-disk*) yaitu kapasitansi yang muncul diantara piringan satu dengan piringan setelahnya dalam satu belitan transformator, permodelan belitan transformator juga dipengaruhi oleh kapasitansi belitan dengan tanah (C_G). C_G dapat dihitung dengan rumus matematis yaitu:

$$C_G = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{bd}{ac}} \epsilon_c l \quad (4.1)$$

Berdasarkan rumus diatas, ketinggian terhadap tanah mempengaruhi dalam perhitungan nilai C_G sehingga dalam perhitungan nilai l akan berubah-ubah sesuai dengan ketinggian belitan terhadap tanah.

Tabel 4.1 Parameter *Continuous Disk Windings*

Urutan Piringan	Ketinggian terhadap Tanah (m)	Nilai C_G (nF)	Tegangan Maksimal (V)	Selisih Tegangan (V)
1	1,311	0,17095	327210	13480
2	1,292271429	0,168508	340690	4440
3	1,273542857	0,166066	345130	580
4	1,254814286	0,163624	345710	1240
5	1,236085714	0,161182	346950	2020
6	1,217357143	0,158739	348970	940
7	1,198628571	0,156297	349910	1670
8	1,1799	0,153855	351580	1580
9	1,161171429	0,151413	353160	3660

Tabel 4.1 Parameter *Continuous Disk Windings* (lanjutan)

Urutan Piringan	Ketinggian terhadap Tanah (m)	Nilai C _G (nF)	Tegangan Maksimal (V)	Selisih Tegangan (V)
10	1,142442857	0,148971	356820	9480
11	1,123714286	0,146529	366300	3150
12	1,104985714	0,144087	369450	7350
13	1,086257143	0,141644	376800	2350
14	1,067528571	0,139202	379150	5260
15	1,0488	0,13676	384410	6480
16	1,030071429	0,134318	390890	3120
17	1,011342857	0,131876	394010	13950
18	0,992614286	0,129434	407960	19440
19	0,973885714	0,126992	427400	9790
20	0,955157143	0,124549	437190	5530
21	0,936428571	0,122107	431660	15520
22	0,9177	0,119665	447180	28480
23	0,898971429	0,117223	475660	13640
24	0,880242857	0,114781	489300	1360
25	0,861514286	0,112339	490660	8130
26	0,842785714	0,109897	482530	10550
27	0,824057143	0,107454	471980	6990
28	0,805328571	0,105012	464990	6470
29	0,7866	0,10257	471460	15400
30	0,767871429	0,100128	486860	10295
31	0,749142857	0,097685	497155	4745
32	0,730414286	0,095243	492410	12730
33	0,711685714	0,092801	479680	2100
34	0,692957143	0,090359	477580	1720
35	0,674228571	0,087917	475860	10110

Tabel 4.1 Parameter *Continuous Disk Windings* (lanjutan)

Urutan Piringan	Ketinggian terhadap Tanah (m)	Nilai C_G (nF)	Tegangan Maksimal (V)	Selisih Tegangan (V)
36	0,6555	0,085475	485970	21545
37	0,636771429	0,083033	507515	17445
38	0,618042857	0,080590	524960	14050
39	0,599314286	0,078148	539010	10080
40	0,580585714	0,075706	549090	5300
41	0,561857143	0,073264	554390	690
42	0,543128571	0,070822	555080	3610
43	0,5244	0,068380	551470	9160
44	0,505671429	0,065937	560630	18720
45	0,486942857	0,063495	579350	12880
46	0,468214286	0,061053	592230	13280
47	0,449485714	0,058611	605510	17610
48	0,430757143	0,056169	623120	11800
49	0,412028571	0,053727	634920	6380
50	0,3933	0,051285	641300	21534
51	0,374571429	0,048842	662834	25626
52	0,355842857	0,0464	688460	23740
53	0,337114286	0,043958	712200	22660
54	0,318385714	0,041516	734860	21470
55	0,299657143	0,039074	756330	19380
56	0,280928571	0,036632	775710	17280
57	0,2622	0,03419	792990	15240
58	0,243471429	0,031747	808230	13310
59	0,224742857	0,029305	821540	12209
60	0,206014286	0,026863	833749	10291
61	0,187285714	0,024421	844040	8540

Tabel 4.1 Parameter *Continuous Disk Windings* (lanjutan)

Urutan Piringan	Ketinggian terhadap Tanah (m)	Nilai C _G (nF)	Tegangan Maksimal (V)	Selisih Tegangan (V)
62	0,168557143	0,021979	852580	6890
63	0,149828571	0,019537	859470	5370
64	0,1311	0,017095	864840	4050
65	0,112371429	0,014652	868890	2880
66	0,093642857	0,012210	871770	1930
67	0,074914286	0,009768	873700	1160
68	0,056185714	0,007326	874860	580
69	0,037457143	0,004884	875440	190
70	0,018728571	0,002442	875630	

Berdasarkan tabel 4.1, nilai C_G dipengaruhi oleh ketinggian dari urutan belitan terhadap tanah. Belitan paling awal merupakan piringan pertama yang terkena gangguan berupa gangguan petir. Urutan piringan selajutnya akan semakin mendekati tanah sehingga nilai *l* akan semakin mengecil dan kapasitansi belitan terhadap tanah akan semakin kecil juga.

Dalam belitan transformator, komponen yang menyusun selain komponen kapasitansi yaitu komponen induktansi dan resistansi. Komponen ini berupa induktor dan resistor yang dipasang secara seri. Komponen resistansi dan induktansi dapat dihitung secara matematis dengan menggunakan rumus sebagai berikut

Spesifikasi Transformator *Continuous Disk Windings*

Nilai rating transformator (MVA) : 30 MVA

Nilai rating transformator (KV) : 66 KV

No Load Losses : 18 KW

Full Load Losses : 65 KW

Impedansi : 12,5%

% Resistansi : 0,217%

% Reaktansi : 12,498%

$$Z = \frac{(66 \times 10^3)^2}{30 \times 10^6}$$

$$Z = 145,2 \, \Omega$$

$$R = \left(\frac{\frac{0.00217}{0.125} \times 145.2}{70} \right)$$

$$R = 0,0360096 \, \Omega$$

$$X_L = \frac{0.12498}{0.125} \times 145.2$$

$$X_L = 145,176768 \, \Omega$$

$$L = \frac{\left(\frac{145.176768}{2\pi 50} \right)}{70}$$

$$L = 6,66016 \, mH$$

Berdasarkan penjelasan diatas, maka didapatkan komponen resistansi, induktansi, dan kapasitansi sebagai berikut

$$R = 0,0360096 \, \Omega$$

$$L = 6,66016 \, mH$$

$$C_s = 0,712529 \, nF$$

Kapasitansi belitan dengan tanah (C_G) memiliki nilai ketinggian belitan terhadap tanah yang berbeda-beda sehingga memiliki nilai C_G yang berbeda-beda pula.

4.1.2 *Smit Windings*

Berikut ini merupakan data-data belitan transformator untuk jenis belitan *smit windings* yang didapatkan dari PT. Bambang Djaja

60 MVA 150 kV 20 kV YNyn0+d 50 Hz (*Smit winding*)

Core diameter : 675 mm

Inner LV diameter : 759 mm

Inner HV diameter : 1049 mm

Outer HV diameter : 1319 mm

Axial length of HV winding : 1604 mm

Blank HV wire dimension :

- *axial / radial* = 14,5 x 14,3 mm (*insulation thickness*: 1,5 mm)
- *Axial: height of conductor, radial: thickness of conductor*

<i>HV winding</i>	: <i>Smit type</i>
- <i>No. Of disc</i>	: 102 <i>disc</i>
- <i>Turns/disc</i>	: 7 <i>turns</i>
- <i>No. of axial canal</i>	: 6 <i>pcs with thickness 5mm</i>
- <i>Radial dimension</i>	: 135 <i>mm</i>

Data tersebut digunakan untuk mendapatkan nilai kapasitansi antar belitan (C_s) dan kapasitansi belitan dengan tanah (C_G). Kaspitansi antar belitan (C_s) dipengaruhi oleh kapasitansi antar lilitan (C_T) dan kapasitansi antar disk (C_D). Nilai C_T dan C_D dapat dicari dengan menggunakan rumusan matematis

$$C_D = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_c (\pi D) (r - n_A w_{AD})}{t_c}$$

$$C_D = \frac{(8,85419 \times 10^{-12})(3,2)(1,184\pi)(0,135 - (6 \times 0,005))}{(1,5 \times 10^{-3})}$$

$$C_D = 0,737357 \text{ nF}$$

$$C_T = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_c (\pi D) (h + t_c)}{t_c}$$

$$C_T = \frac{(8,85419 \times 10^{-12})(3,2)(1,184\pi)(0,0145 + (1,5 \times 10^{-3}))}{1,5 \times 10^{-3}}$$

$$C_T = 0,112359 \text{ nF}$$

Sehingga didapatkan kapasitansi antar belitan (C_s) dengan menggunakan rumus matematis sebagai berikut

$$C_s = \left(\frac{1}{N}\right) \left(\frac{n - n_A - 1}{n^2}\right) C_T + \left(\frac{4}{3}\right) \left(\frac{N - 1}{N^2}\right) C_D$$

$$C_s = \left(\frac{1}{102}\right) \left(\frac{7 - 6 - 1}{7^2}\right) (2,49819 \times 10^{-10}) + \left(\frac{4}{3}\right) \left(\frac{102 - 1}{102^2}\right) (8,07108 \times 10^{-10})$$

$$C_s = 9,73505 \text{ nF}$$

Selain dipengaruhi oleh kapasitansi antar belitan (C_s), permodelan belitan transformator juga dipengaruhi oleh kapasitansi belitan dengan tanah (C_G). C_G dapat dihitung dengan rumus matematis sesuai dengan persamaan (4.1).

Berdasarkan persamaan (4.1), ketinggian terhadap tanah mempengaruhi dalam perhitungan nilai C_G sehingga dalam perhitungan nilai l akan berubah-ubah sesuai dengan ketinggian belitan terhadap tanah.

Tabel 4.2 Parameter *Smit Windings*

Urutan Piringan	Ketinggian terhadap Tanah (m)	Nilai C_G (nF)	Tegangan Maksimal (V)	Selisih Tegangan (V)
1	1,604	0,212514	716710	9400
2	1,58827451	0,210431	726110	7250
3	1,57254902	0,208347	733360	5895
4	1,556823529	0,206264	739255	245
5	1,541098039	0,20418	739010	1370
6	1,525372549	0,202097	737640	600
7	1,509647059	0,200013	738240	4900
8	1,493921569	0,19793	743140	3560
9	1,478196078	0,195846	746700	2120
10	1,462470588	0,193763	744580	443
11	1,446745098	0,191679	744137	3093
12	1,431019608	0,189596	747230	1648
13	1,415294118	0,187513	748878	1352
14	1,399568627	0,185429	750230	18620
15	1,383843137	0,183346	768850	28190
16	1,368117647	0,181262	797040	15730
17	1,352392157	0,179179	781310	4070
18	1,336666667	0,177095	777240	20350
19	1,320941176	0,175012	756890	3330
20	1,305215686	0,172928	760220	24500
21	1,289490196	0,170845	784720	10600
22	1,273764706	0,168761	795320	33430

Tabel 4.2 Parameter *Smit Windings* (lanjutan)

Urutan Piringan	Ketinggian terhadap Tanah (m)	Nilai C_G (nF)	Tegangan Maksimal (V)	Selisih Tegangan (V)
23	1,258039216	0,166678	828750	16900
24	1,242313725	0,164594	845650	35570
25	1,226588235	0,162511	881220	18760
26	1,210862745	0,160427	862460	43550
27	1,195137255	0,158344	818910	46800
28	1,179411765	0,15626	865710	20890
29	1,163686275	0,154177	844820	26600
30	1,147960784	0,152094	871420	6920
31	1,132235294	0,15001	864500	31280
32	1,116509804	0,147927	833220	7560
33	1,100784314	0,145843	825660	16150
34	1,085058824	0,14376	841810	750
35	1,069333333	0,141676	842560	18680
36	1,053607843	0,139593	861240	14210
37	1,037882353	0,137509	875450	12020
38	1,022156863	0,135426	887470	2060
39	1,006431373	0,133342	885410	28150
40	0,990705882	0,131259	857260	15390
41	0,974980392	0,129175	841870	22290
42	0,959254902	0,127092	864160	40410
43	0,943529412	0,125008	904570	15720
44	0,927803922	0,122925	920290	15600
45	0,912078431	0,120841	904690	7060
46	0,896352941	0,118758	897630	15790
47	0,880627451	0,116674	913420	6720
48	0,864901961	0,114591	920140	33702

Tabel 4.2 Parameter *Smit Windings* (lanjutan)

Urutan Piringan	Ketinggian terhadap Tanah (m)	Nilai C _G (nF)	Tegangan Maksimal (V)	Selisih Tegangan (V)
49	0,849176471	0,112508	886438	14922
50	0,83345098	0,110424	901360	22950
51	0,81772549	0,108341	924310	17450
52	0,802	0,106257	941760	2820
53	0,78627451	0,104174	944580	10820
54	0,77054902	0,10209	955400	23170
55	0,754823529	0,100007	978570	8440
56	0,739098039	0,0979232	970130	26290
57	0,723372549	0,0958397	996420	15880
58	0,707647059	0,0937563	1012300	13070
59	0,691921569	0,0916728	999230	6770
60	0,676196078	0,0895893	1006000	29500
61	0,660470588	0,0875	1035500	35600
62	0,644745098	0,0854224	1071100	17800
63	0,629019608	0,0833389	1088900	10700
64	0,613294118	0,0812554	1099600	34900
65	0,597568627	0,079172	1134500	12200
66	0,581843137	0,0770885	1146700	29000
67	0,566117647	0,075005	1117700	31500
68	0,550392157	0,0729215	1149200	50751
69	0,534666667	0,0708381	1199951	32347
70	0,518941176	0,0687546	1232298	7502
71	0,503215686	0,0666711	1239800	16500
72	0,487490196	0,0645877	1223300	35500
73	0,471764706	0,0625042	1187800	31600
74	0,456039216	0,0604207	1219400	53300

Tabel 4.2 Parameter *Smit Windings* (lanjutan)

Urutan Piringan	Ketinggian terhadap Tanah (m)	Nilai C _G (nF)	Tegangan Maksimal (V)	Selisih Tegangan (V)
75	0,440313725	0,0583372	1272700	52000
76	0,424588235	0,0562538	1324700	62500
77	0,408862745	0,0541703	1387200	48300
78	0,393137255	0,0520868	1435500	30000
79	0,377411765	0,0500033	1465500	11300
80	0,361686275	0,0479199	1476800	6600
81	0,345960784	0,0458364	1470200	27100
82	0,330235294	0,0437529	1497300	30800
83	0,314509804	0,0416695	1528100	10700
84	0,298784314	0,039586	1538800	1841
85	0,283058824	0,0375025	1536959	2141
86	0,267333333	0,035419	1539100	84800
87	0,251607843	0,0333356	1623900	80789
88	0,235882353	0,0312521	1704689	78611
89	0,220156863	0,0291686	1783300	71100
90	0,204431373	0,0270851	1854400	63100
91	0,188705882	0,0250017	1917500	58200
92	0,172980392	0,0229182	1975700	51115
93	0,157254902	0,0208347	2026815	42785
94	0,141529412	0,0187513	2069600	34900
95	0,125803922	0,0166678	2104500	27401
96	0,110078431	0,0145843	2131901	20699
97	0,094352941	0,0125008	2152600	14600
98	0,0786274510	0,0104174	2167200	10000
99	0,062901961	0,00833389	2177200	5800
100	0,047176471	0,00625042	2183000	3015

Tabel 4.2 Parameter *Smit Windings* (lanjutan)

Urutan Piringan	Ketinggian terhadap Tanah (m)	Nilai C _G (nF)	Tegangan Maksimal (V)	Selisih Tegangan (V)
101	0,03145098	0,00416695	2186015	985
102	0,01572549	0,00208347	2187000	

Berdasarkan tabel 4.2, nilai C_G dipengaruhi oleh ketinggian dari urutan belitan terhadap tanah. Belitan paling awal merupakan piringan pertama yang terkena gangguan berupa gangguan petir. Urutan piringan selanjutnya akan semakin mendekati tanah sehingga nilai *l* akan semakin mengecil sehingga kapasitansi belitan terhadap tanah akan semakin kecil juga.

Dalam belitan transformator, komponen yang menyusun selain komponen kapasitansi yaitu komponen induktansi dan resistansi. Komponen ini berupa induktor dan resistor yang dipasang secara seri. Komponen resistansi dan induktansi dapat dihitung secara matematis dengan menggunakan rumus sebagai berikut

Spesifikasi Transformator *Smit Windings*

Nilai rating transformator (MVA)	: 60 MVA
Nilai rating transformator (KV)	: 150 KV
<i>No Load Losses</i>	: 10 KW
<i>Full Load Losses</i>	: 100 KW
Impedansi	: 12%
% Resistansi	: 0,5%
% Reaktansi	: 11,990%

$$Z = \frac{(150 \times 10^3)^2}{60 \times 10^6}$$

$$Z = 375 \Omega$$

$$R = \left(\frac{\frac{0,00167}{0,1199} \times 375}{102} \right)$$

$$R = 0,051164216 \Omega$$

$$X_L = \frac{0.1199}{0.12} \times 375$$

$$X_L = 374,6875 \Omega$$

$$L = \frac{\left(\frac{374.6875}{2\pi 50}\right)}{102}$$

$$L = 11,692817 \text{ mH}$$

Berdasarkan penjelasan diatas, maka didapatkan komponen resistansi, induktansi, dan kapasitansi sebagai berikut

$$R = 0,051164216 \Omega$$

$$L = 11,692817 \text{ mH}$$

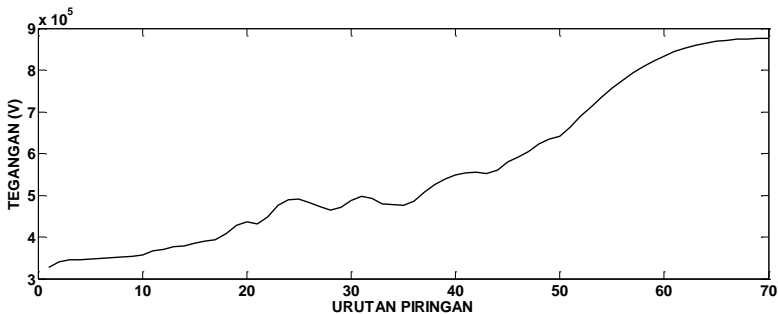
$$C_s = 9,73505 \text{ nF}$$

Kapasitansi belitan dengan tanah (C_G) memiliki nilai ketinggian belitan terhadap tanah yang berbeda-beda sehingga memiliki nilai C_G yang berbeda-beda pula.

4.2 Distribusi Tegangan Impuls

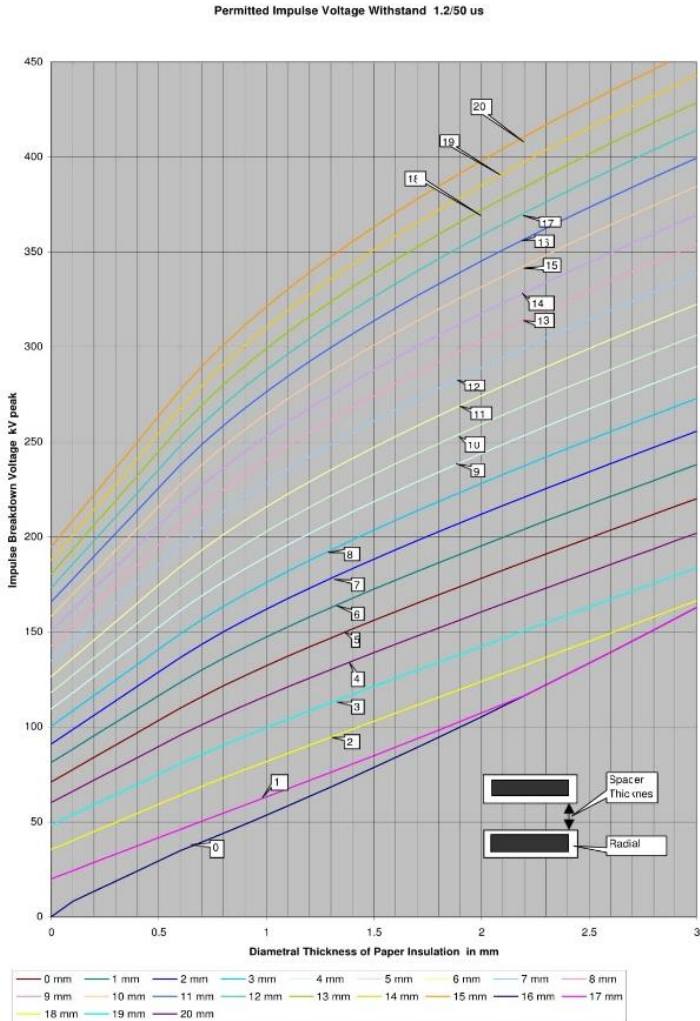
4.2.1 Continuous Disk Windings

Berdasarkan tabel 4.1, tegangan maksimal pada tiap piringan memiliki nilai tegangan yang berbeda-beda. Nilai tegangan yang berbeda-beda ini dipengaruhi oleh nilai resistansi, induktansi dan nilai kapasitansi. Dengan ketinggian terhadap tanah yang berbeda-beda, nilai C_G akan memiliki nilai yang berbeda-beda juga.



Gambar 4.2 Grafik Tegangan Maksimal Continuous Disk Windings

Pada gambar 4.2, nilai tegangan maksimal pada setiap piringan akan mengalami kenaikan hingga piringan terakhir. Tegangan pada piringan awal memiliki tegangan maksimal 327210V dengan nilai yang hampir sama dengan tegangan impuls yang diberikan yaitu 325kV.

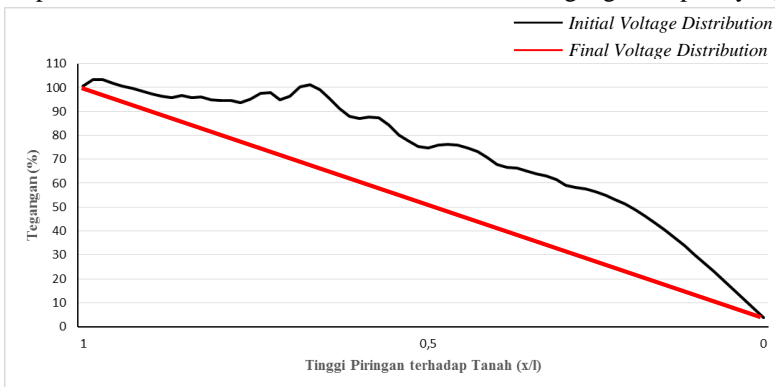


Gambar 4.3 Standar Ketahanan Isolasi [14]

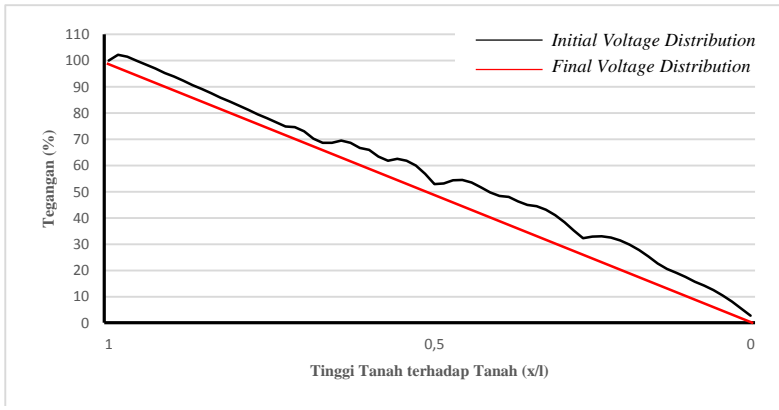
Pada jenis belitan *continuous disk windings*, selisih tegangan antar piringan tidak melebihi batas maksimal dari standar yang ditentukan. Selisih tegangan antar piringan memiliki selisih nilai tegangan minimum yaitu 190V antara piringan ke 69 dan piringan ke 70 dan selisih tegangan maksimum yaitu 28480V berada antara piringan ke 21 dan piringan ke 22. Gambar 4.3 merupakan grafik standar ketahanan isolasi dari belitan transformator (*safety factor*) [14]. Berdasarkan gambar 4.3, selisih tegangan maksimal yang mampu ditahan oleh isolasi ini adalah 110 kV. Belitan transformator jenis *continuous disk windings* memiliki ketebalan isolasi konduktor atau *thickness of conductor insulation* (t_c) 1,2mm dan ketebalan saluran antar piringan atau *thickness of duct between disk* (t_D) yaitu 3mm.

Dengan selisih tegangan maksimum antar piringan yaitu 28480V, isolasi dari transformator masih dapat menahan tegangan lebih dari gangguan petir. Belitan jenis ini mampu menahan tegangan lebih sehingga isolasi dari belitan transformator tidak akan mengalami kegagalan dengan tegangan pengujian sesuai standar BIL untuk tegangan 66 kV yaitu 325 kV.

Dalam gambar 4.4, distribusi tegangan impuls awal pada belitan *continuous disk windings* memiliki bentuk yang cukup jauh dari distribusi tegangan impuls akhir. Jarak garis distribusi tegangan impuls awal dari *continuous disk windings* tidak mendekati garis dari distribusi tegangan impuls akhir. Pada gambar 4.5, distribusi tegangan impuls disimulasikan dengan nilai C_g yang sama di tiap piringannya. Jika distribusi tegangan impuls tersebar secara normal dan merata, nilai tegangan impuls yang



Gambar 4.4 Distribusi Tegangan Impuls *Continuous Disk Windings*

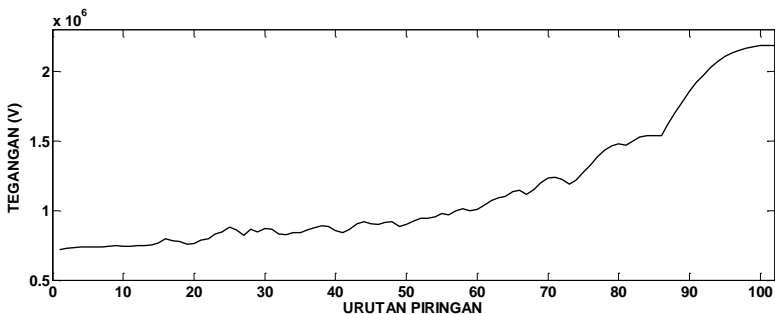


Gambar 4.5 Distribusi Tegangan Impuls *Continuous Disk Windings* dengan nilai C_g sama

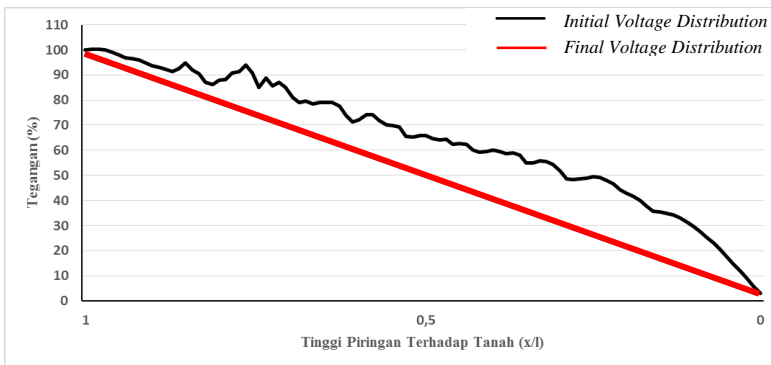
didapatkan dari piringan pertama hingga piringan terakhir memiliki nilai tegangan impuls yang semakin menurun. Pada jenis belitan *continuous disk windings*, persebaran tegangan impuls tidak merata di tiap-tiap piringannya. Pada piringan ke-24 dan 25, tegangan impuls yang didapatkan melebihi dari tegangan impuls pada piringan awal.

4.2.2 Smit Windings

Pada jenis belitan *smit windings*, tegangan maksimal pada tiap piringan memiliki kenaikan terus menerus hingga piringan terakhir. Nilai tegangan maksimal pada piringan awal memiliki nilai 716710V dengan nilai yang hampir sama dengan tegangan impuls yang diberikan pada saat simulasi yaitu 650 kV. Berdasarkan tabel 4.2, nilai tegangan maksimal



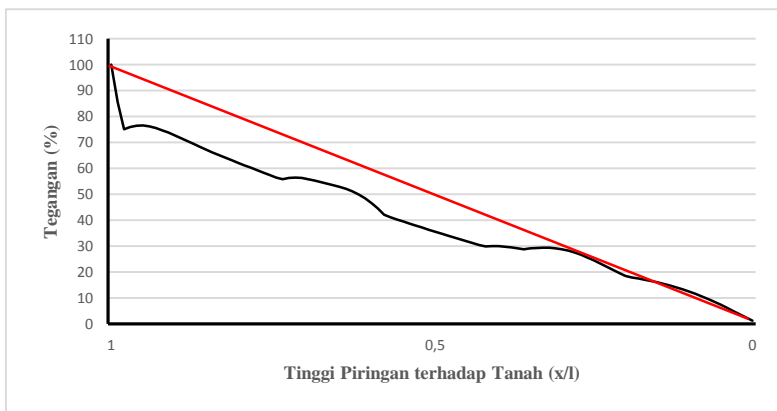
Gambar 4.6 Grafik Tegangan Maksimal *Smit Windings*



Gambar 4.7 Distribusi Tegangan Impuls *Smit Windings*

yang dihasilkan oleh jenis belitan *smit windings* berada pada piringan terakhir yaitu 218700V.

Selisih tegangan impuls antar piringan pada jenis belitan *smit windings* berada pada batas standar yang ditentukan. Nilai selisih tegangan minimum yang dihasilkan yaitu 245 V pada piringan ke 4 dan piringan ke 5 dan nilai selisih tegangan maksimal yaitu 84800V pada piringan ke 86 dan piringan ke 87. Berdasarkan gambar 4.3, batas tegangan yang diperbolehkan untuk ketebalan isolasi konduktor 3mm dan lebar saluran aksial 5mm adalah 220 kV. Jadi, belitan transformator jenis



Gambar 4.8 Distribusi Tegangan Impuls *Smit Windings* dengan nilai C_g sama

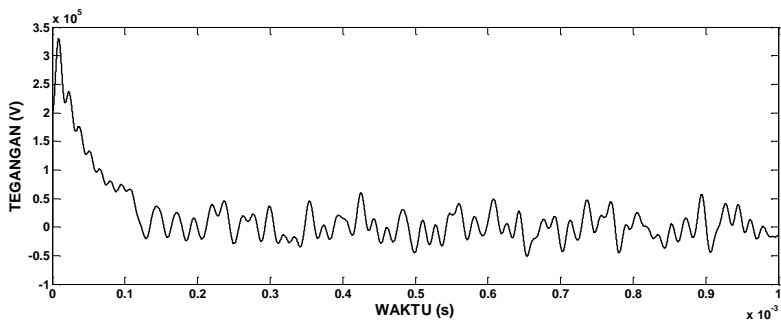
smit winding mampu menahan gangguan tegangan lebih dari gangguan petir. Belitan jenis ini tidak akan mengalami kegagalan karena tidak melebihi batas maksimal 220 kV.

Jika dibandingkan dengan belitan jenis *continuous disk windings*, tegangan maksimal pada jenis belitan *smit windings* memiliki kenaikan tegangan yang bertahap antara piringan satu dengan piringan yang lain. Berdasarkan gambar 4.6, grafik dari kenaikan tegangan maksimal mengalami kenaikan yang lebih tinggi saat piringan ke 68. Setelah piringan ke 68, tegangan naik lebih tinggi daripada sebelum piringan ke 68. Puncak dari kenaikan tegangan maksimal berada pada piringan terakhir yaitu 1948434V. Jika pada jenis *continuous disk windings*, tegangan maksimal naik lebih tinggi daripada jenis belitan *smit disk windings*.

Dalam gambar 4.7, distribusi tegangan impuls awal pada belitan *smit windings* memiliki nilai yang melebihi distribusi tegangan impuls akhir. Jika dibandingkan dengan jenis belitan *continuous disk windings*, jenis belitan *smit windings* memiliki persebaran tegangan impuls yang lebih baik. Jarak antara garis distribusi tegangan impuls akhir dengan dsitribusi tegangan impuls awal pada belitan *smit windings* tidak terlalu jauh. Pada gambar 4.8, distribusi tegangan impuls pada jenis belitan *smit windings* disimulasikan dengan nilai C_g yang sama di tiap piringannya. Distribusi tegangan impuls pada tiap-tiap piringan tidak ada yang melebihi nilai distribusi tegangan pada piringan awal. Persebaran tegangan impuls dari jenis belitan ini relatif mengalami penurunan nilai tegangan hingga mendekati piringan terakhir.

4.3 Bentuk Gelombang Pada Belitan

Bentuk gelombang yang dihasilkan pada tiap-tiap piringan memiliki bentuk yang berbeda-beda. Selain itu, nilai tegangan pada tiap-tiap piringan juga memiliki nilai yang berbeda-beda. Hal ini disebabkan oleh komponen resistansi, induktansi, dan kapasitansi dari permodelan belitan transformator. Dalam simulasi permodelan belitan transformator, gelombang impuls digunakan sebagai sumber gangguan tegangan lebih. Gelombang impuls ini memiliki puncak tegangan 325 kV dan 650 kV dengan karakteristik waktu gelombang adalah $1,2/50 \mu s$. Dalam prosesnya, tegangan impuls ini akan mengalami kenaikan dan penurunan nilai tegangan pada masing-masing piringan. Selain itu, tegangan pada satu piringan juga mengalami osilasi atau keadaan naik turunnya tegangan yang nilainya berubah-ubah. Osilasi ini disebabkan oleh permodelan



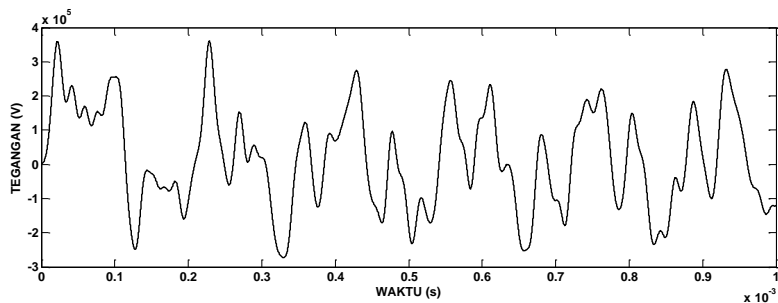
Gambar 4.9 Gelombang Piringan ke-1 *Continuous Disk Windings* selama 0,001 detik

belitan transformator yang terdiri dari komponen resistansi, induktansi, dan kapasitansi. Komponen resistansi akan memiliki pengaruh meredam osilasi dari gelombang yang dihasilkan karena memiliki nilai tahanan tertentu. Jadi, bentuk gelombang akan mengalami redaman hingga detik tertentu sesuai dengan nilai dari masing-masing komponen.

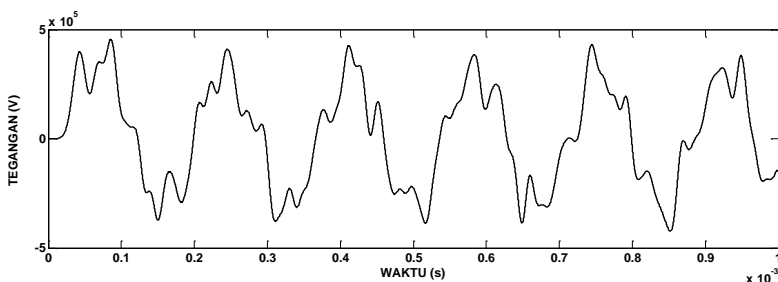
4.3.1 *Continuous Disk Windings*

Dalam tugas akhir ini, gelombang jenis belitan *continuous disk windings* dihasilkan pada piringan ke-1, 11, 31, 51, dan 70 dengan durasi waktu yang diambil adalah 0,001 detik dan 2 detik.

Gambar 4.9 merupakan bentuk gelombang yang dihasilkan untuk jenis belitan *continuous disk windings* pada piringan ke-1 dengan nilai tegangan maksimal yaitu 327210V hingga waktu 0,001 detik. Bentuk



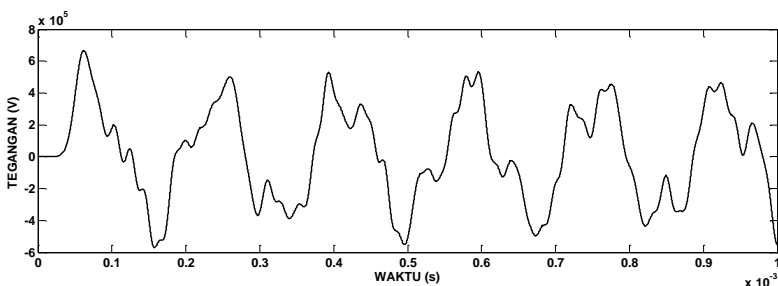
Gambar 4.10 Gelombang Piringan ke-11 *Continuous Disk Windings* selama 0,001 detik



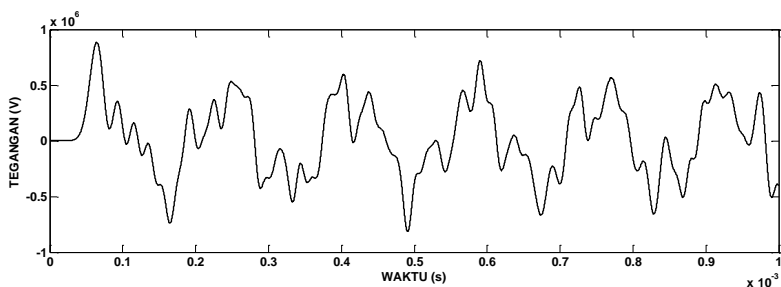
Gambar 4.11 Gelombang Piringan ke-31 *Continuous Disk Windings* selama 0,001 detik

gelombang pada gambar 4.7 terlihat bahwa urutan piringan ke-1 akan menerima gangguan tegangan lebih berupa tegangan impuls sebesar 325kV. Nilainya tegangan maksimal piringan ke-1 memiliki nilai yang hampir sama dengan tegangan impuls yang diberikan karena piringan ke-1 akan menerima gangguan tegangan lebih pertama kali. Nilai tegangan maksimum ini akan mengalami penurunan nilai karena adanya komponen resistansi dari belitan transformator. Namun, nilainya mengalami osilasi dengan nilai tegangan awal yang tinggi kemudian semakin lama akan semakin menurun nilai tegangannya hingga teredam karena adanya pengaruh komponen resistansi, induktansi, dan kapasitansi.

Pada piringan ke-11, gelombang yang dihasilkan memiliki nilai tegangan maksimal yang semakin naik. Nilai tegangan maksimal yang dihasilkan pada piringan ke-11 adalah 366300V. Pada gambar 4.10, gelombang yang dihasilkan hingga 0,001 detik memiliki osilasi dengan nilai yang lebih besar. Nilai osilasi yang terlihat pada gambar 4.10



Gambar 4.12 Gelombang Piringan ke-51 *Continuous Disk Windings* selama 0,001 detik



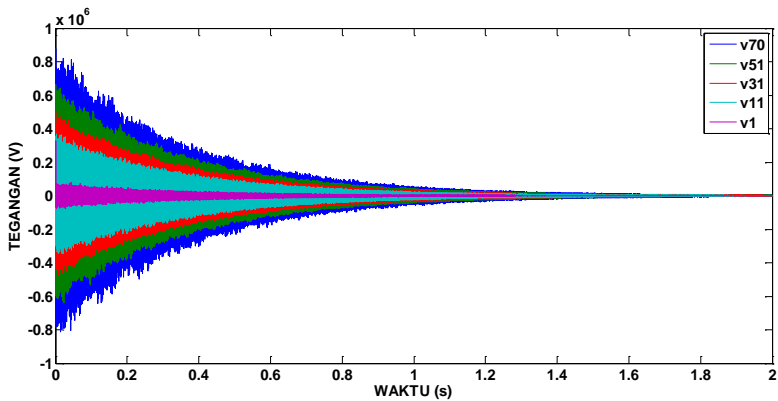
Gambar 4.13 Gelombang Piringan ke-70 *Continuous Disk Windings* pada 0,001 detik

memiliki nilai yang hampir sama dengan awal puncak gelombang. Selain itu, awal terbangkitnya gelombang mengalami pergeseran waktu. Naiknya gelombang impuls terjadinya pada 0,03 ms.

Pada piringan ke-31, gelombang yang dihasilkan memiliki nilai tegangan maksimal yang semakin naik. Nilai tegangan maksimal yang dihasilkan pada piringan ke-31 adalah 497115V. Pada gambar 4.11, gelombang yang dihasilkan hingga 0,001 detik memiliki osilasi dengan nilai yang lebih besar daripada piringan sebelumnya. Selain itu, awal terbangkitnya gelombang mengalami pergeseran waktu. Naiknya gelombang impuls terjadinya pada 0,05 ms.

Pada piringan ke-51, gelombang yang dihasilkan memiliki nilai tegangan maksimal yang semakin naik. Nilai tegangan maksimal yang dihasilkan pada piringan ke-51 adalah 662834V. Pada gambar 4.12, gelombang yang dihasilkan hingga 0,001 detik memiliki osilasi dengan nilai yang lebih besar daripada piringan sebelumnya. Gelombang osilasi pada piringan ke-51 juga mengalami perubahan bentuk dari bentuk gelombang pada piringan sebelumnya. Selain itu, awal terbangkitnya gelombang mengalami pergeseran waktu. Naiknya gelombang impuls terjadinya pada 0,05 ms.

Pada piringan ke-70, gelombang yang dihasilkan memiliki nilai tegangan maksimal yang semakin naik. Nilai tegangan maksimal yang dihasilkan pada piringan ke-70 adalah 875630V. Pada gambar 4.13, gelombang yang dihasilkan hingga 0,001 detik memiliki osilasi dengan



Gambar 4.14 Gelombang Piringan ke-1, 11, 31, 51, dan 70 *Continuous Disk Windings* selama 2 detik

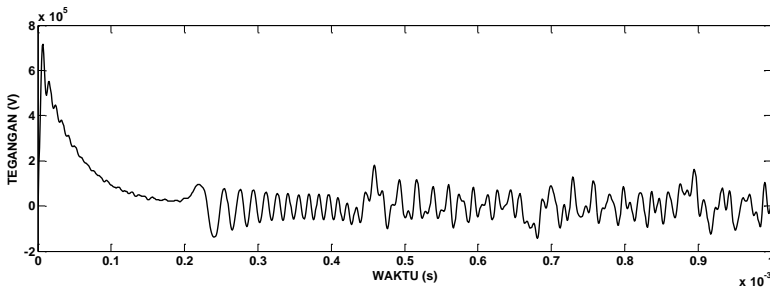
nilai yang lebih besar daripada piringan sebelumnya. Selain itu, awal terbangkitnya gelombang mengalami pergeseran waktu. Naiknya gelombang impuls terjadinya pada 0,07 ms. Awal munculnya gelombang yang lebih lama dari piringan sebelumnya disebabkan karena letak dari piringan ini yaitu berada pada piringan ke-70.

Pada gambar 4.14, gelombang impuls diperlihatkan pada piringan ke-1, 11, 31, 51, dan 70 selama 2 detik. Gelombang yang dihasilkan pada semua piringan memiliki bentuk gelombang sinus teredam. Gelombang sinus teredam ini memiliki karakteristik gelombang yang berosilasi terus menerus dengan nilai tegangan yang berubah-ubah. Jenis gelombang ini akan mengalami redaman hingga waktu tertentu dimana nilai tegangannya akan mendekati nilai terendahnya atau nilai tegangan nol.

4.3.2 *Smit Windings*

Dalam tugas akhir ini, gelombang jenis belitan *smit windings* dihasilkan pada piringan ke-1, 31, 51, 71, dan 102 dengan durasi waktu yang diambil adalah 0,001 detik dan 2 detik.

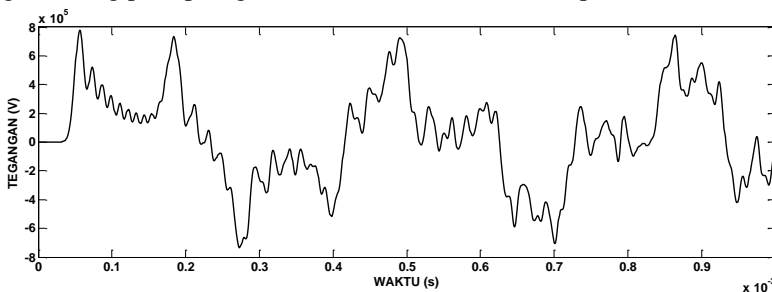
Dalam gambar 4.15, gelombang yang dihasilkan merupakan gelombang pada piringan awal atau piringan ke-1 dari susunan jenis belitan *smit windings*. Gelombang pada belitan awal menerima gangguan tegangan lebih berupa tegangan impuls pertama kali sehingga nilai yang dihasilkan akan mendekati nilai tegangan impuls yang diberikan yaitu



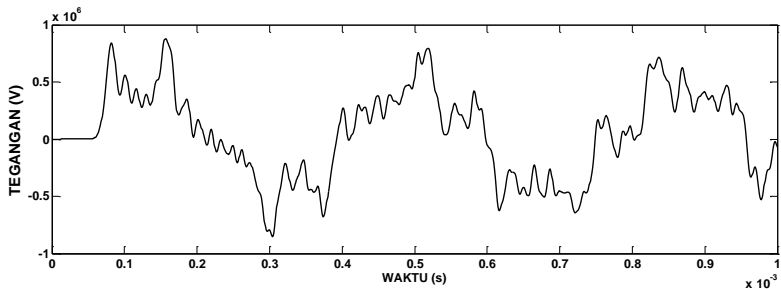
Gambar 4.15 Gelombang Piringan ke-1 *Smit Windings* selama 0,001 detik

761710V. Pada belitan awal transformator, gelombang impuls yang dihasilkan akan mengalami osilasi tetapi nilainya tidak terlalu tinggi. Nilai dari osilasi gelombang impuls pada piringan ke-1 tidak melebihi nilai tegangan puncak awal.

Dalam gambar 4.16, gelombang yang dihasilkan merupakan gelombang pada piringan ke-31 dari susunan jenis belitan *smit windings*. Nilai tegangan maksimal yang dihasilkan pada piringan ke-31 adalah 864500V. Tegangan maksimal yang dihasilkan memiliki nilai tegangan maksimal yang semakin naik daripada piringan sebelumnya. Pada gambar 4.16, simulasi gelombang impuls dilakukan selama 0,001 detik. Pada piringan ke-41 puncak awal tegangan impuls pertama terjadi pada saat 0,08ms. Bentuk gelombang mengalami osilasi terhadap nilai tegangan pada piringan ke-31. Tinggi dari osilasi gelombang yang terjadi mengalami kenaikan nilai. Osilasi ini menyebabkan bentuk dari gelombang pada piringan ke-31 berubah-ubah terhadap waktu.

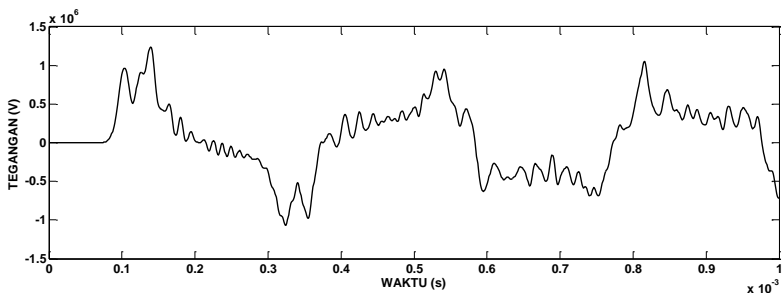


Gambar 4.16 Gelombang Piringan ke-31 *Smit Windings* selama 0,001 detik

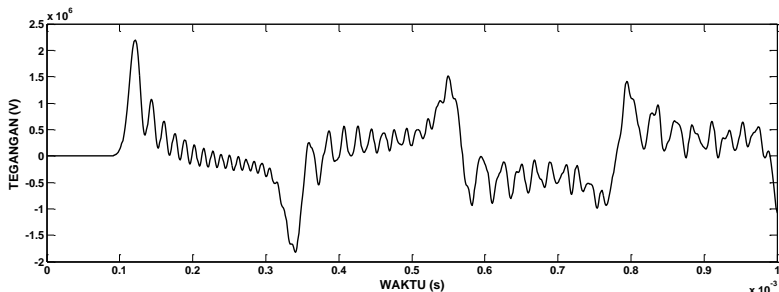


Gambar 4.17 Gelombang Piringan ke-51 *Smit Windings* selama 0,001 detik

Dalam gambar 4.17, gelombang yang dihasilkan merupakan gelombang pada piringan ke-51 dari susunan jenis belitan *smit windings*. Nilai tegangan maksimal yang dihasilkan pada piringan ke-51 adalah 924310V. Tegangan maksimal yang dihasilkan memiliki nilai tegangan maksimal yang semakin naik daripada piringan sebelumnya. Pada gambar 4.17, simulasi gelombang impuls dilakukan selama 0,001 detik. Pada piringan ke-51, puncak awal tegangan impuls pertama terjadi pada saat 0,1ms. Puncak awal tegangan impuls yang pertama kali terjadi memiliki nilai yang lebih besar dari nilai tegangan impuls yang diberikan. Nilai dari perubahan tiap waktu juga semakin naik. Perubahan nilai tegangan ini diakibatkan oleh adanya komponen resistansi, induktansi, dan kapasitansi pada permodelan belitan transformator.

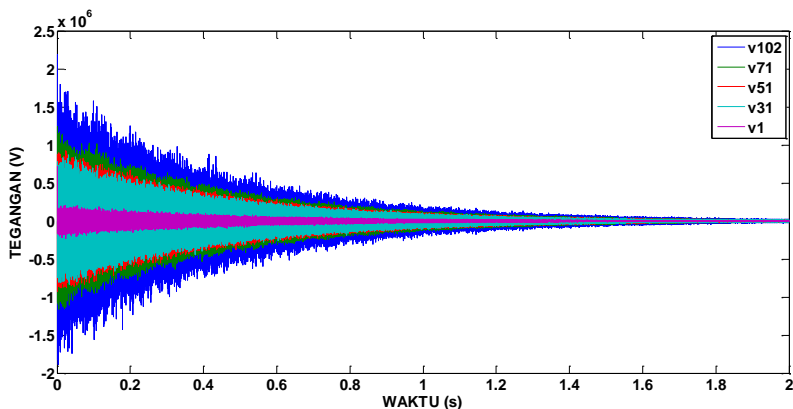


Gambar 4.18 Gelombang Piringan ke-71 *Smit Windings* selama 0,001 detik



Gambar 4.19 Gelombang Piringan ke-102 *Smit Windings* selama 0,001 detik

Dalam gambar 4.18, gelombang yang dihasilkan merupakan gelombang pada piringan ke-71 dari susunan jenis belitan *smit windings*. Nilai tegangan maksimal yang dihasilkan pada piringan ke-71 adalah 1239800V. Tegangan maksimal yang dihasilkan memiliki nilai tegangan maksimal yang semakin naik daripada piringan sebelumnya. Pada gambar 4.18, simulasi gelombang impuls dilakukan selama 0,001 detik. Pada piringan ke-71 puncak awal tegangan impuls pertama terjadi pada saat 0,12ms. Bentuk gelombang mengalami osilasi terhadap nilai tegangan pada piringan ke-71. Tinggi dari osilasi gelombang yang terjadi mengalami kenaikan nilai. Osilasi ini menyebabkan bentuk dari gelombang pada piringan ke-71 berubah-ubah terhadap waktu.



Gambar 4.20 Gelombang Piringan ke-1, 31, 51, 71, dan 102 *Smit Windings* selama 2 detik

Pada piringan ke-102 atau piringan terakhir, bentuk gelombang yang dihasilkan memiliki nilai tegangan maksimal yaitu 2187000 V. Nilai tegangan maksimal yang dihasilkan melebihi nilai tegangan impuls yang diberikan yaitu 650 kV. Puncak tegangan awal terjadi pada saat 0,125 ms karena urutan piringan yang berada paling akhir dari susunan piringan jenis *smit windings* terlihat pada gambar 4.19. Awal munculnya gelombang yang lebih lama dari piringan sebelumnya disebabkan karena letak dari piringan ini yaitu berada pada piringan ke-102.

Pada gambar 4.20, gelombang impuls diperlihatkan pada piringan ke-1, 31, 51, 71, dan 102 selama 2 detik. Gelombang yang dihasilkan pada semua piringan memiliki bentuk gelombang sinus teredam. Gelombang sinus teredam ini mengalami osilasi yang terus menerus dan akan mengalami redaman dengan nilai akhir tegangan yang akan menurun. Adanya osilasi dan redaman ini dikarenakan komponen dari penyusun belitan transformator yaitu komponen resistansi (R), induktansi (L), dan kapasitansi (C). Gelombang sinus teredam ini memiliki karakteristik gelombang yang berosilasi terus menerus dengan nilai tegangan yang berubah-ubah. Jenis gelombang ini akan mengalami redaman hingga waktu tertentu dimana nilai tegangannya akan mendekati nilai terendahnya atau nilai tegangan nol.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan analisa dari jenis belitan *continuous disk windings* dan *smit windings* diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai kapasitansi antar belitan (C_s) *smit windings* sebesar 9,73505 nF lebih besar daripada *continuous disk windings* sebesar 0,712529 nF. Dengan nilai C_s yang lebih besar, distribusi tegangan impuls pada jenis belitan *smit windings* lebih merata pada masing-masing piringannya.
2. Batas maksimum beda tegangan tiap piringan pada *continuous disk windings* adalah 110 kV sedangkan selisih tegangan maksimum yang didapatkan adalah 28 kV. Pada jenis *smit windings*, batas maksimum adalah 220 kV sedangkan selisih tegangan maksimum yang didapatkan 84 kV. Jadi, kedua jenis belitan mampu menahan gangguan sambaran petir.
3. Tegangan maksimal pada tiap-tiap piringan di jenis belitan *continuous disk windings* dan *smit windings* akan terus naik.
4. Tegangan pada tiap jenis belitan akan mengalami redaman sehingga nilai tegangan pada masing-masing piringan akan semakin menurun.

5.2 Saran

Dari studi yang telah dilakukan diperoleh beberapa rekomendasi yaitu:

1. Jenis belitan transformator dapat menggunakan jenis belitan *intershield disk windings*.
2. Penambahan cicin perata dan tabir konduktif dapat meratakan distribusi tegangan pada belitan transformator.
3. Perhitungan mengenai pengaruh gelombang berjalan pada belitan transformator.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Chapman, Stephen. J. "Electric Machinery Fundamentals: Fourth Edition," McGraw-Hill Education, New York, Ch. 2, 2005.
- [2] M.Heidarzadeh, M.R. Besmi, "Influence Of Transformer Layer Winding Parameters On The Capacitive Characteristic Coefficient", IJTPE Journal, Iran, June, 2013.
- [3] Mehdi Bagheri, Arsalan Hekmati, R.Heidarzadeh, M.Salay Naderi, "Impulse Voltage Distribution in Intershield Disk Winding VS Interleaved and Continuous Disk Winding in Power Transformer", 2nd IEEE PECon, December, Malaysia, 2008.
- [4] Kulkarni,S.V. ; Khaparde, S.A. "Transformer Engineering: Design and Practice," Marcell Decker, Inc, New York, Ch. 1, 2004.
- [5] Kanchan Rani, R.S Goryan, "Transient Voltage Distribution In Transformer Winding", International Journal of Research in Engineering and Technology, April, 2013.
- [6] Bharat Heavy Electrical Limited, "Transformers", McGraw-Hill Companies. Inc, New York, Ch. 5, 2005
- [7] Gerhardus Johannes Hulsink, "Transformer Winding In The Form Of A Disc Winding Provided With Axial Channels", European Patent Application EP0370574B1, November, Germany, 1989
- [8] Tobing, Bonggas L., "Peralatan Tegangan Tinggi Edisi Kedua", Penerbit Erlangga, Jakarta, Bab. 10, 2012
- [9] Anugrah, Priska Bayu, "Simulasi dan Analisis Pengaruh Tegangan Lebih Impuls Pada Belitan Transformator Distribusi 20KV". Tugas Akhir, Institut Teknologi Sepuluh Nopember: Surabaya, 2010
- [10] Hutaeruk, T.S., "Gelombang Berjalan dan Proteksi Surja", Penerbit Erlangga, Jakarta, Bab. 1, 1989

- [11] International Electrotechnical Commission, “Insulation Level, Dielectric Tests And External Clearance In Air”, IEC Central Office, Switzerland, 2013
- [12] Negara, I Made Yulistya, “Teknik Tegangan Tinggi”, Graha Ilmu, Yogyakarta, Bab. 4, 2013
- [13] PT. Bambang Djaja, “Manual Book Transformers”, Surabaya, 2017
- [14] AREVA, “Power Transformers Design Handbook”, 2004

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Akbar Dwi Syahputra lahir di Pekalongan pada tanggal 12 Juli 1995. Anak kedua dari 2 bersaudara ini menempuh pendidikan dasar di SD Muhammadiyah 2 Bendan pada tahun 2001-2007, kemudian SMPN 2 Pekalongan pada tahun 2007-2010, dan lulus dari SMAN 1 Pekalongan pada tahun 2013. Pada tahun 2013 juga, penulis diterima sebagai mahasiswa di departemen Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) dan mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Semasa kuliah, aktif sebagai asisten Laboratorium Tegangan Tinggi 2016-2017. Penulis dapat dihubungi melalui email akbardwisyahputra123@gmail.com

Halaman ini sengaja dikosongkan